



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta biomedicínského inženýrství  
Katedra přírodovědných oborů**

**Rozdíly v refrakčním deficitu u noční myopie**

**Refractive deficiency differences in night myopia**

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Optika a optometrie

**Autor práce: Zuzana Zatloukalová**

Vedoucí práce: Bc. Přemysl Kučera

---

**Kladno, Květen 2017**

Katedra přírodovědných oborů

Akademický rok: 2016/2017

## Z a d á n í   b a k a l á ř s k é   p r á c e

Student: **Zuzana Zatloukalová**  
Obor: Optika a optometrie  
Téma: **Rozdíly v refrakčním deficitu u noční myopie**  
Téma anglicky: Refractive deficiency differences in night myopia

### Zásady pro vypracování:

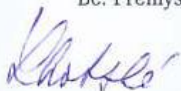
Studentka představí etiologii a klasifikaci myopie, popíše teorii barevného vidění a vidění za mezopických a skotopických podmínek. Studentka vysvětlí příčiny vzniku noční myopie, symptomy a možnosti vyšetření této vady. V praktické části připraví vhodný protokol pro evidenci dat a porovná vidění (refrakční deficit) za různých světelných podmínek. Výsledky statisticky zpracuje.

### Seznam odborné literatury:

- [1] BENJAMIN, W. J., Borish's Clinical Refraction, ed. 2., Butterworth-Heinemann-Elsevier, 2006, 1694 s., ISBN 978-0-7506-7524-6
- [2] DOSHI, S., HARVEY, W., Eye Essentials: Assessment & Investigative Techniques, ed. 1., Elsevier, 2005, 186 s., ISBN 978-0-7506-8853-6
- [3] SKUSEVICH D., MATIKAS, P., Color Perception - Physiology, Processes and Analysis, ed. 1., Nova Science Publishers Inc., 2010, 286 s., ISBN 978-1-60876-077-0

Zadání platné do: 11.09.2018

Vedoucí: Bc. Přemysl Kučera



vedoucí katedry / pracoviště



děkan

V Kladně dne 20.02.2017

## **Název bakalářské práce:** Noční myopie

### **Abstrakt:**

Práce se zabývá problematikou noční myopie. Tématu předchází etiologie a klasifikace myopie. Dále je popsána teorie barevného vidění, se zaměřením na fotopické, mezopické a skotopické podmínky. Následující kapitoly jsou zaměřeny na symptomy noční myopie, důvody jejího vzniku, možnosti vyšetření této vady a představení korekce. Pozornost je věnována především akomodaci a aberacím vyšších řádů, jakožto hlavním faktorům vyvolávající tento stav. Experimentální částí se zúčastnilo 50 probandů, na kterých byl naměřen refrakční deficit za mezopických a skotopických podmínek.

### **Klíčová slova:**

noční myopie, adaptace oka, akomodace, aberace vyšších řádů, vyšetření noční myopie

## **Thesis's title:** Night myopia

### **Abstract:**

The thesis deals with the issues of night myopia. The project firstly describes etiology and classifies myopia before it focuses on the main topic of night myopia. The theory of colour perception is also described in this work, mainly the photopic, mesopic and scotopic conditions. Next chapters focus on symptoms of night myopia, its main causes, possibilities of examination and correction. The primary focus of this work is on accommodation and higher order aberrations of the eye, which are major factors contributing to the formation of night myopia. There were 50 people tested in the experiment in order to measure the refraction deficiency in mesopic and scotopic conditions.

### **Key words:**

night myopia, eye adaptation, accommodation, higher order aberrations, examination of night myopia

## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala svému vedoucímu práce Bc. Přemyslu Kučerovi za cenné rady a připomínky, vstřícnost při konzultacích a odborné vedení mé bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat všem, kteří mi byli oporou při psaní této práce.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „*Rozdíly v refrakčním deficitu u noční myopie*“ vypracovala samostatně a použila k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V ..... dne .....

.....

podpis

# Obsah

Úvod.....	1
1 Myopie .....	3
1.1 Definice .....	3
1.2 Symptomy .....	3
1.3 Etiologie .....	4
1.4 Klasifikace.....	5
1.4.1 Dělení podle původu .....	5
1.4.2 Dělení podle dioptrické hodnoty.....	6
1.4.3 Dělení podle progresu .....	6
1.5 Korekce .....	6
2 Teorie vidění .....	8
2.1 Vznik zrakového vjemu .....	8
2.2 Sítňice.....	8
2.2.1 Fotoreceptory .....	9
2.3 Teorie barevného vidění.....	11
2.4 Vidění za různých světelných podmínek .....	12
2.4.1 Fotopické vidění .....	12
2.4.2 Skotopické vidění .....	12
2.4.3 Mezopické vidění.....	12
3 Noční myopie.....	14
3.1 Symptomy .....	14
3.2 Adaptace na intenzitu světla.....	14
3.2.1 Pupila .....	15
3.2.2 Adaptace na světlo .....	15
3.2.3 Adaptace na tmu .....	16
3.3 Příčiny noční myopie .....	17

3.3.1	Akomodace .....	17
3.3.2	Purkyňův jev .....	21
3.3.3	Aberace .....	22
3.4	Vyšetření noční myopie .....	27
3.4.1	Objektivní refrakce .....	27
3.4.2	Subjektivní refrakce .....	32
3.5	Korekce noční myopie .....	36
4	Experimentální část.....	37
4.1	Cíl práce .....	37
4.2	Metodika .....	37
4.2.1	Vyšetřovna a použité vybavení.....	37
4.2.2	Pracovní a světelné podmínky .....	37
4.2.3	Průběh měření .....	38
4.2.4	Metodika statistické analýzy.....	41
4.3	Pracovní hypotézy .....	41
4.4	Statistická analýza.....	42
	Diskuze .....	51
	Závěr .....	53
	Seznam použité literatury .....	54
	Seznam symbolů a zkratek .....	57
	Seznam obrázků.....	58
	Seznam tabulek.....	60
	Seznam příloh .....	61

## Úvod

Práce pojednává o problematice noční myopie. U noční myopie dochází k poklesu zrakové ostrosti, což může být problém zejména u řidičů nebo lidí pracujících v prostředí se sníženou světelnou intenzitou. Příčina není doposud zcela známa, bylo však zjištěno, že lidské oko reaguje na sníženou hladinu světla rozšířením zornic a přehnanou akomodací. Napomáhají tomu také aberace, které zhoršují obraz pozorovaného předmětu. Noční myopii se optometristé v praxi zabývají pouze okrajově. Avšak refrakční deficit způsobený touto vadou, není zcela zanedbatelný. V práci se zaměřuji nejen na noční myopii, ale také představuji možné postupy vyšetření spolu s návrhem měření noční myopie.

Tématu předchází všeobecné objasnění myopie jako sférické vady, protože noční myopie je speciálním případem krátkozrakosti. V úvodní části je představena etiologie a klasifikace myopie společně s korekcí této vady. Další část je věnována zejména noční myopii a související problematice. Pro začátek je důležité vysvětlit funkci sítnice, která je zodpovědná za předběžné zpracování světelných signálů. Následná část je věnována funkcím jednotlivých typů buněk (tyčinkám a čípkům). Nedílnou součástí práce je popis teorie vidění, kde je objasněn jak vznik zrakového vjemu, tak přímo Young-Helmholtzova (trichromatická) teorie. Detailně je popsáno fyziologické vidění za fotopických, skotopických a v neposlední řadě mezopických podmínek.

Následující kapitola je zaměřena na hlavní téma práce - noční myopii. V první části je popisována adaptace oka na různou intenzitu světla. Práce pojednává jak o adaptaci na světlo, tak o adaptaci na tmu, která je pro lidské oko daleko složitější a trvá mnohem déle. V této kapitole je věnována malá část měření dané adaptace a konkrétním hodnotám přizpůsobení zrakového aparátu na intenzitu světla. V následující kapitole jsou objasněny možné příčiny vzniku noční myopie. Zahrnuje akomodaci, jakožto schopnost oka zvýšit optickou mohutnost soustavy a jakou roli hraje při noční myopii. Důraz je kladen také na aberace napomáhající navodit tento stav. Zaměřuje se na chromatickou vadu, která je způsobena nestejným lomem světelných paprsků různé vlnové délky, sférickou vadu, která má za následek neostrost obrazu nebo Purkyňův posun, který hraje v noční myopii také značnou roli. Další část se zabývá vyšetřením noční myopie jak prostřednictvím objektivní, tak subjektivní metody. V současné době je možné noční myopii vyšetřit prostřednictvím nové generace optotypu v podobě PolaScopu. Popsán je white point test pro možnou korekci noční myopie, který je také použit pro experimentální část práce. Poslední kapitola teoretické části je věnována korekci noční



myopie. Je zde diskutován přínos korekce v praxi a případná možnost řešení vady v podobě nočních brýlí.

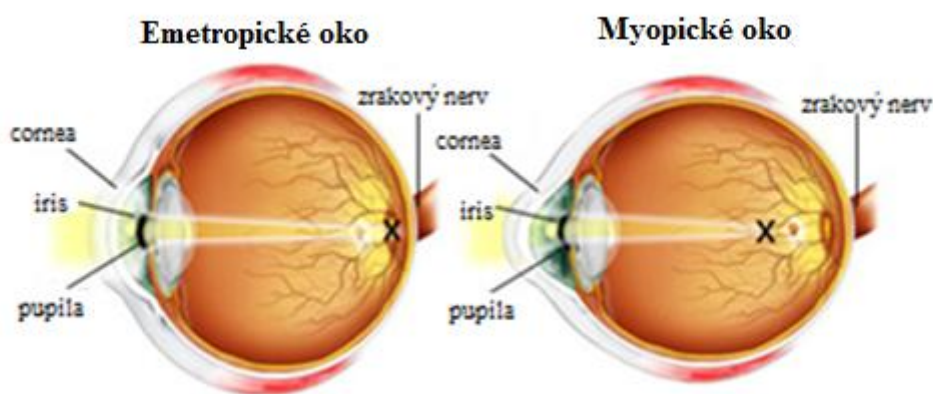
V experimentální části je popsána metodika vyšetření noční myopie. Zmíněny jsou přístroje a vybavení, které bylo použito pro praktickou část. Dále jsou popsány pracovní a světelné podmínky potřebné k navození optimálního osvětlení. Detailně je popsána metodika měření za fotopických, mezopických a skotopických podmínek. Hlavní částí této kapitoly je statistické zpracování naměřených dat. Následně jsou graficky vyhodnoceny refrakční deficity za mezopických a skotopických podmínek. Dále jsou porovnány poklesy vízu za jednotlivých světelných podmínek a následné nárůsty s vhodnou korekcí. Okrajově je práce zaměřena také na změny heteroforie za mezopických a skotopických podmínek.

Cílem práce je teoreticky popsat současný stav problematiky noční myopie, vytvořit adekvátní protokol pro sběr dat, změřit refrakční deficit za mezopických a skotopických podmínek u 50 probandů, statisticky data zpracovat a ověřit stanovené hypotézy.

# 1 Myopie

## 1.1 Definice

Myopie neboli krátkozrakost je sférická refrakční vada oka. Při zcela uvolněné akomodaci se paprsky paralelní s optickou osou sbíhají před sítnicí, místo na sítnici, jako u emetropického oka. Tento jev má za následek, že předměty umístěné v nekonečnu, jsou na sítnici zobrazeny v podobě neostrého obrazu. U myopického oka leží tedy daleký bod R (*punctum remotum*) v konečné vzdálenosti před okem. Při pozorování předmětů ležících mezi dalekým bodem a okem je zapotřebí menší akomodace než u emetropa. To může mít za následek oslabení akomodace a vést až k akomodační ochablosti. Vada je nejčastěji způsobena předozadní délkou oka, popřípadě lámavostí optických médií oka nebo jejich kombinací. [1, 2, 8]



**Obr. 1:** Paprsky dopadající na sítnici emetropického a myopického oka

Zdroj: <http://www.visionoptique.com/ocular-surface-eye-disease/vision-problems/myopia/> (upraveno)

## 1.2 Symptomy

Nejčastějším projevem myopie je neostřý, rozmazaný, zamlžený obraz při pohledu do dálky. Naopak vidění do blízké vzdálenosti je zachováno ostré, nejedná-li se o vysoký stupeň myopie. Laicky řečeno, můžeme tvrdit, že člověk trpící myopií vidí dobře do blízka a špatně do dálky. Mezi další příznaky je zahrnováno přivírání očí, tzv. mhouření očí, ve snaze zaostřit na vzdálenější objekty. Termín myopie je podle Galena odvozen od řeckého sousloví myein, překládáno jako “zavřít” a ops, což znamená “oko”. Krátkozrací lidé částečně přivírají oči,

aby zúžili oční štěrbinu, a tím snížili sférickou (otvorovou) vadu oka. Myopie je nejčastěji odhalena ve školních letech, kdy děti pocítují zhoršené vidění na tabuli nebo si nadměrně přibližují čtený text, což může vést k napětí očí či bolesti hlavy při snaze zaostřit obraz. Neurčitá cefalgie a astenopie může být projevem nekorigované refrakční vady, při vysokých dioptrických hodnotách se rovněž může objevit i nauzea. Někteří lidé mohou zaznamenat rozmazané vidění na dálku pouze v noci. To je způsobeno nízkou hladinou osvětlení, viz noční myopie. [1, 3, 4, 16]

### 1.3 Etiologie

Krátkozrakost postihuje téměř třetinu populace. Přesná příčina není dodnes známá, i když existuje mnoho teorií vzniku myopie. Vada je pravděpodobně podmíněna geneticky. Pokud jeden nebo oba rodiče jsou krátkozrací, je vyšší pravděpodobnost, že touto refrakční vadou bude postižen i potomek. Jedním z projevů vlivu genetiky je právě prevalence. Výskyt krátkozrakosti je nejvyšší v Asii, zde dosahují hodnoty myopie 70-90 % populace. V Evropě a Americe podstatně méně, a to 30-40 %. V Africe pak trpí myopií pouze 10-20 % obyvatel. Výskyt krátkozrakosti tedy závisí nejen na zemi a rase, ale také věku, povolání, či na životním prostředí a na dalších faktorech. Goss a Winkler zkoumali refrakční záznamy pacientů a poznamenali, že k zastavení krátkozrakosti došlo dříve u ženských subjektů. Můžeme se tedy domnívat, že na krátkozrakost má v určité míře vliv také pohlaví. Podle nedávné studie Brien Holden Vision Institute se celosvětová prevalence myopie ( $\leq -0,50$  dpt) zvýší z 28 % světové populace na téměř 50 % populace do roku 2050. [1, 4, 12, 10, 16]

I přesto, že je kvalita zraku predispozičně vázána, má na ni vliv také naše pracovní vzdálenost. Někteří autoři vidí právě tento problém ve skutečnosti přizpůsobování se moderní době, kterou přináší civilizace. U Jedinců, kteří tráví hodně času čtením, prací na počítači, nebo jinou intenzivní prací do blízka, může dojít k ovlivnění jejich vývoje. Doposud však není prokázáno, zda má práce do blízka vliv na myopii nebo myopie způsobuje, že se více pracuje na krátkou vzdálenost. Obecně platí, že myopie se poprvé projevuje ve školním věku. To je způsobeno tím, že lidské oko roste přibližně do 20 let a z hypermetropického stavu může přerůst až do myopického. Nicméně, krátkozrakost může vzniknout i u dospělých následkem křeče v podobě pseudomyopie nebo změnou celkového zdravotního stavu, jako například v případě vzniku diabetes mellitus, katarakty nebo ektázie rohovky atd. [4, 8, 16]

## 1.4 Klasifikace

### 1.4.1 Dělení podle původu

#### Axiální myopie

Nejčastěji se setkáváme s axiální myopií, kde příčina krátkozrakosti spočívá v nepřiměřeně dlouhé předozadní ose bulbu. Podle Gullstrandova schematického modelu oka činí délka bulbu od vrcholu rohovky do centrální jamky sítnice 24 mm. K prodloužení bulbu dochází obvykle před pubertou v procesu emetropizace a končí s ukončením tělesného růstu. Považujeme-li hypermetropické oko za oko nedostatečně vyvinuté, pak oko myopické je vyvinuté nadměrně. Prodloužení bulbu o 1 mm vyvolá myopii v hodnotě -3 dpt. [1, 3, 8]

#### Indexová myopie

Indexová myopie je způsobena vyšším indexem lomu, čímž dochází ke zvýšené lomivosti světelných paprsků. Rohovka s indexem lomu 1,376 je nejúčinnější z celého dioptrického systému a představuje tak více než 2/3 lomivosti. Zbývající necelou 1/3 lomivosti zajišťuje čočka. Její index lomu je nehomogenní, v periferní oblasti je nižší a plynule vzrůstá směrem k centru. Posuzujeme-li čočku jako celek, pak její index lomu je asi 1,420. S indexovou myopií se setkáváme například u pacientů s diabetem či s počínající nukleární kataraktou (šedým zákalem). Dochází ke snížení indexu lomu korových čočkových hmot, za zvýšené lomivosti jádra čočky. Pokud dojde ke změně indexu lomu sklivce nebo komorové vody, nedochází k výraznějším změnám v optickém systému oka. [1, 3, 8]

#### Kurvturní (křivková) myopie

Ke kurvturní myopii dochází, pokud je zvýšeno zakřivení jedné nebo více refrakčních ploch. Při zmenšení poloměru křivosti rohovky o 1 mm nastane myopizace přibližně o -6 dpt. Kurvturní myopie je mnohem vzácnější než předchozí typy. U keratokonu a jiných ektatických onemocnění dochází ke zmenšení poloměru zakřivení rohovky. Zvýšené zakřivení doprovází z pravidla také astigmatismus. Vzácněji dochází ke zmenšení předního či zadního poloměru zakřivení pouzdra čočky (*lenticonus anterior et posterior*) v důsledku těžké glykémie. V případě spasmu akomodace nebo po úrazu dochází ke zvýšené lomivosti čočky i za uvolněného napětí závěsného aparátu čočky (*ligamentum lentis*). [1, 8, 9]

Musíme vzít v úvahu, že všechny biometrické odchylky oka se nejen mohou skládat a vytvářet větší refrakční vadu, ale v opačném případě i navzájem kompenzovat. Například pokud jde o oko s relativně krátkou axiální délkou a zároveň vysokou celkovou lomivostí

nebo o oko s relativně dlouhou axiální délkou a nízkou celkovou refrakční lomivostí, není vyloučeno, že se bude jednat o emetropa. [1]

### 1.4.2 Dělení podle dioptrické hodnoty

Podle počtu dioptrií potřebných ke korekci rozdělujeme krátkozrakost na lehkou, střední, těžkou. Myopii nejčastěji dělíme do čtyř kategorií podle dioptrické hodnoty a to na lehkou, střední, vysokou a těžkou. Lehká myopie (*myopia simplex*) se pohybuje v hodnotách od  $-0,25$  dpt do  $-3$  dpt. Střední myopie (*myopia modica*) v rozsahu od  $-3,25$  do  $-6,00$  dpt. Myopie těžká (*myopia gravis*) spadá do dioptrických hodnot nad  $-6,00$  dpt. [2]

### 1.4.3 Dělení podle progresu

Donders klasifikoval krátkozrakost na základě rychlosti její progresu a vzniku souvisejících degenerativních změn. Rozdělil ji do tří kategorií: stacionární, dočasně progresivní a trvale progresivní.

Stacionární progresu nabývá poměrně nízkých dioptrických hodnot v rozmezí od  $-1,50$  do  $-2,00$ . Vzniká ve vývojovém období a v dospělosti už nadále neprogreduje.

Dočasně progresivní myopie vzniká obvykle v časném mladistvém věku a pokračuje až do adolescence. Po adolescentním období míra progresu víceméně stagnuje a nárůst vady se blíží k nulovým hodnotám. Míra progresu krátkozrakosti je obvykle nižší v období adolescence než míra progresu v raném dětství.

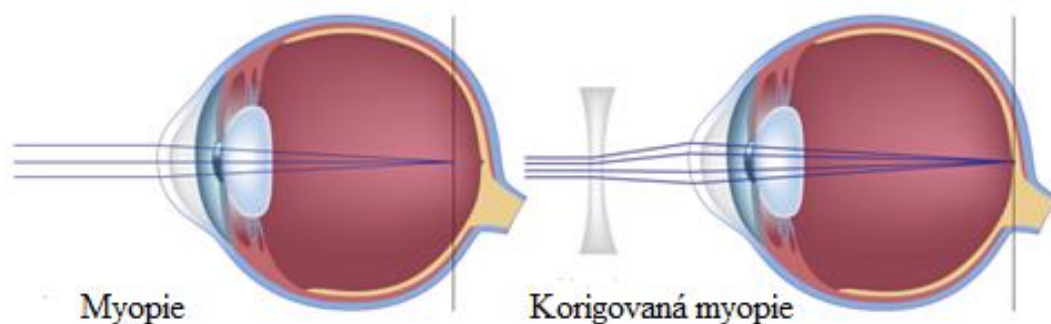
Trvale progresivní myopie nabývá vyššího růstu až kolem 25 až 35 let, a poté postupuje pomaleji. Následné zvýšení myopie se pohybuje spíše ve skocích hodnot, než že by měla pozvolný průběh nárůstu. [1]

## 1.5 Korekce

Krátkozrakost korigujeme konkávní (minusovou) čočkou, se kterou je dosaženo posunutí obrazu na sítnici do místa nejostřejšího vidění (viz obr. 2). V případě překorigování myopie, se z myopa stává pseudohypermetrop a člověk je nucen akomodovat i při pohledu do dálky. Tento stav je pro něj neobvyklý a může vést k astenopickým problémům. Proto je důležité korigovat nejslabší možnou rozptylnou čočkou, která zároveň ještě zajišťuje ostrý obraz na sítnici. Někteří optometristé se dokonce domnívají, že brýle pro celodenní nošení je vhodné lehce podkorigovat. [8]

Všechny formy korekce mají své výhody i nevýhody. Možnostmi, jak kompenzovat tuto ametropii, jsou brýle, kontaktní čočky nebo oční operace. Pro většinu lidí s krátkozrakostí jsou brýle primární volbou korekce. Obecně platí, že jednoohnisková čočka je předepisována tak, aby korigovala vadu na všechny vzdálenosti. Nicméně u mladých presbyopů může být refrakční vada z počátku využívána jako kompenzace nedostatečné elasticity čočky. Odložení brýlí pro práci do blízka je jednodušší a rychlejší než manipulace s kontaktní čočkou. Měkké kontaktní čočky naopak nabízejí nezkreslené vidění, širší zorné pole a nezmenšují obraz proti brýlím. Avšak u korekční pomůcky v podobě kontaktních čoček je nezbytná náležitá péče a hygiena. Další formou je ortokeratologie, při které dochází ke změně poloměru zakřivení rohovky za pomoci tvrdých plynopropustných RGP (Rigid Gas Permeable) čoček. Tento typ korekce je reverzibilní, na rozdíl od laserových zákroků, které jsou také formou řešení myopie. Chirurgická korekce využívá excimerové lasery jako LASIK (Laser In Situ Keratomileusis), LASEK (Laser Epithelial Keratomileusis) nebo PRK (Photorefractive Keratectomy). Tento typ zákroku však není vhodný pro každého, při vysoké myopii nebo příliš tenké rohovce není vhodné podstupovat laserovou operaci. Existují další invazivní zákroky v podobě nitroočních čoček. Aplikaci fakických a afakických nitroočních čoček je dávana přednost u vyšších myopií. Chirurgické řešení lze doporučit zvláště tam, kde myop nesnáší korekci brýlemi, ani kontaktní čočkou. [4, 8]

Existuje celá řada řešení, jak korigovat myopii, nejdůležitější je zvolit ideální formu po konzultaci s optometristou nebo oftalmologem.



**Obr. 2:** Paprsky dopadající na sítnici myopického oka a oka korigovaného konkávní čočkou

Zdroj: [www.visionexcellence.com.au/common-eye-conditions/myopia-short-sightedness/](http://www.visionexcellence.com.au/common-eye-conditions/myopia-short-sightedness/)

## 2 Teorie vidění

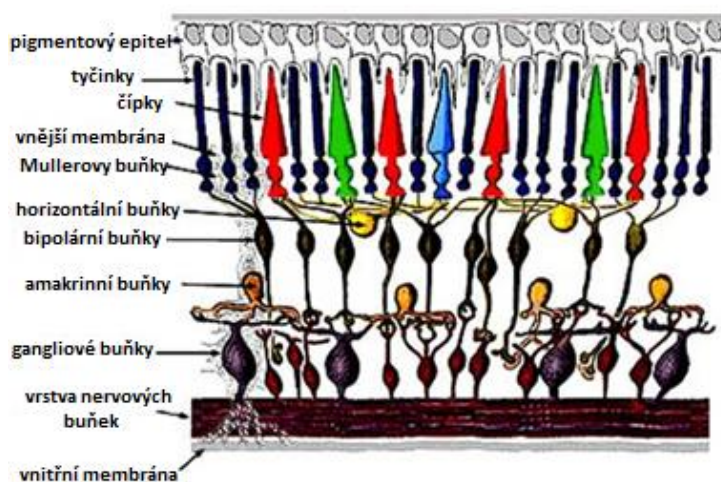
### 2.1 Vznik zrakového vjemu

Oko přijímá světelné podněty v podobě elektromagnetického záření a přeměňuje je na nervové impulsy. Zrakový aparát je schopen rozpoznat pro nás viditelné světlo v rozmezí vlnových délek 380–760 nm. Světelný paprsek prochází rohovkou, přední komorou, duhovkou, čočkou, dále pak sklivcem a dopadá na sítnici. Tento světelný impuls se poté transformuje pomocí světločivných buněk na výstupní nervový signál putující zrakovým nervem a dále zrakovou dráhou do zrakového centra v týlním laloku, kde je následně mozkiem zpracován. [1]

### 2.2 Sítnice

Sítnice (*retina*) je tenká průhledná blanka, 0,1 až 0,25 mm silná, která je tvořena vysoce diferencovanou nervovou tkání. Nachází se ve vnitřní vrstvě *bulbus oculi*, přesně v *tunica nervosa*. Její přední část (*pars caeca retinae*) postrádá fotoreceptory a nervové buňky, naopak obsahuje pigmentovou vrstvu působící jako izolační vrstva, která pohlcuje dopadající paprsky a zabraňuje jejich odrazu. Zadní část sítnice (*pars optica*) obsahuje světločivé buňky, které umožňují vjem světla a následnou přeměnu světla v nervové podráždění. Zadní část sítnice se skládá z 10 vrstev, které vidíme na obr. 3. [2]

Nervovou skladbu sítnice lze rozdělit do tří pater. První vrstva je tvořena senzorickým epitelem (tyčinky a čípky), který přiléhá na pigmentový list. Vodivé výběžky světločivných buněk směřují směrem dovnitř a napojují se na dendrity malých bipolárních buněk, které ve svém celku vytvářejí *ganglion retinae*. Druhá etáž je tvořena bipolárními buňkami, jejichž neurity se napojují na dendrity velkých multipolárních gangliových buněk, které vytváří *ganglion opticum*. Třetí část je tvořena gangliovými buňkami, které směřují do papily zrakového nervu a vytváří tak zrakový nerv (*nervus opticus*). Neurity dále pokračují přes *chiasma opticum* a *tractus opticus* a směřují ke *corpus geniculatum laterale*, kde primární zraková dráha končí. [2, 3, 9]



Obr. 3: Vrstvy sítnice

Zdroj: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/486-stavba-oka>

Přijímaný světelný signál je modifikován v každé synaptické úrovni sítnice. V prvním patře je zpracována informace o statickém obrazu, obraz je analyzován na druhé synaptické úrovni. V případě skotopického vidění, které zprostředkovávají tyčinky, nejde signál z bipolárních buněk do gangliových, ale přes vmezežené amakrinní buňky. Světelný paprsek musí tedy projít celou sítnicí, než se dostane k světločivným elementům tyčinkám a čípkům. [6]

Část sítnice, která leží v zorné ose oka, se nazývá žlutá skvrna (*macula lutea*). Název je odvozen od žlutozeleného zabarvení, způsobeného pigmentem xantofylem. V centrální části makuly, kde se vyskytují pouze čípky, se nachází prohlubeň nazývaná *foveola centralis*. Vnitřní vrstvy sítnice jsou ve *foveole centralis* vytlačeny k periferii makuly. To má za následek, že je tato část sítnice ztenčena na 0,1 mm a je tvořena výhradně čípkami. Díky tomuto anatomickému uspořádání je *foveola centralis* místem nejostřejšího vidění [2, 9]

Slepá skvrna je místo na sítnici, na kterém se nenacházejí světločivné elementy (čípky ani tyčinky) a sbíhají se zde nervová vlákna z celé sítnice, které vystupují z oční koule v podobě zřetivého nervu. [2]

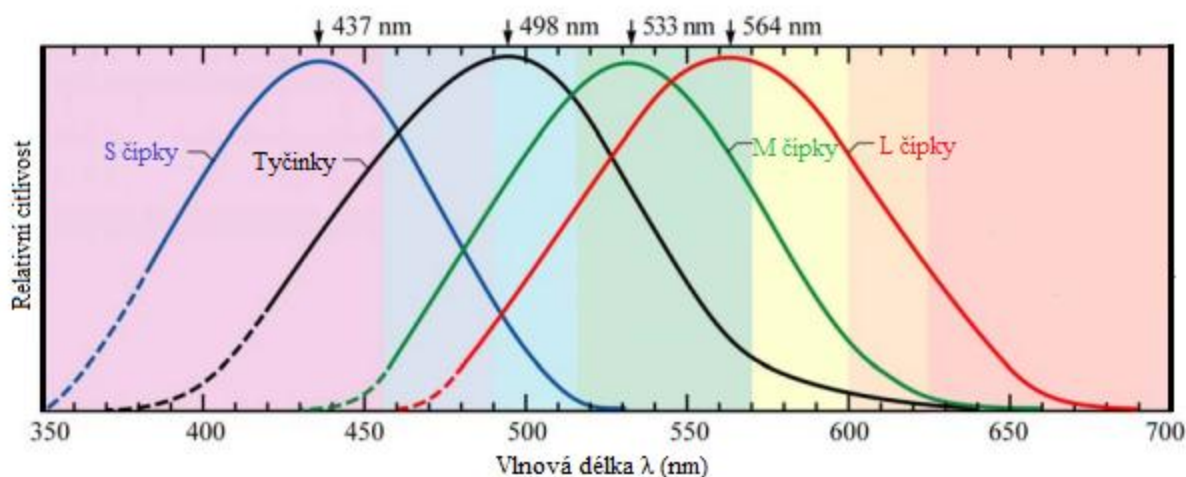
### 2.2.1 Fotoreceptory

Lidské oko má dva typy fotoreceptorů, které jsou zodpovědné za vnímání světla: tyčinky a čípky. Citlivost těchto dvou detektorů optického záření se v různých světelných podmínkách mění. [11]



**Tyčinky** jsou světločivné buňky zprostředkovávající černobílé vidění. Podílejí se hlavně na vnímání kontrastu obrazu a umožňují periferní vidění. Sítnice obsahuje asi 120 milionů tyčinek nacházejících se převážně v periferní části. Tyčinky jsou oproti čípkům mnohem citlivější na světlo, jsou schopny reagovat už na 1 foton světla. To je přibližně stokrát větší citlivost než dosahují čípky. Citlivost na některé vlnové délky viditelného spektra je zprostředkována díky pigmentu rhodopsinu. Rhodopsin neboli zrakový purpur je složený z proteinové části opsinu a z neproteinové části 11-cis-retinalu. Maximum spektrální citlivosti tyčinek se pohybuje okolo 500 nm, naopak v oblasti nad 650 nm již nejsou tyčinky vůbec aktivní. Díky své citlivosti, se právě tyčinky podílejí na vidění v podmínkách se sníženou světelnou intenzitou. [11, 13]

**Čípky** zprostředkovávají barevné vidění. V současnosti existuje teorie, že se na barevném vidění mohou za jistých okolností částečně podílet i tyčinky. Sítnice obsahuje přibližně dvacet krát méně čípků než tyčinek, tedy 6 milionů čípků. Převážně jsou rozmístěny v centrální části sítnice, směrem do periferie jejich hustota klesá. *Foveola centralis* je tvořena pouze hustě uspořádanými čípkami a neobsahuje tyčinky. U čípků se nachází fotoaktivní pigment iodopsin. Každý druh čípků má trochu odlišnou opsinovou část pigmentu. To je důvodem, proč je daný typ čípku citlivý na určitý rozsah vlnové délky světla. U člověka existují tři typy čípků. S (short) krátké čípky, které jsou citlivé na vlnovou délku odpovídající modré barvě. Maximální citlivost S čípků je okolo 440 nm. M (medium) středně dlouhé čípky jsou citlivé na vlnovou délku v rozmezí 450-630 nm, tedy na zelenou barvu. Maximální citlivost se pohybuje okolo 545 nm. Poslední L (long) dlouhé čípky reagují na vlnovou délku v rozsahu červené barvy a jsou nejcitlivější na hodnoty okolo 570 nm. Spektrální citlivosti receptorů se částečně překrývají. To znamená, že pokud na čípky bude působit záření o vlnové délce 500 nm, podrážděny budou jak S čípky tak M čípky a výsledný vjem bude modrozelený (viz barevné vidění). V bílém světle jsou všechny vlnové délky zastoupeny rovnoměrně, bílé světlo tedy dráždí všechny tři druhy čípků se stejnou intenzitou. [5, 11, 13]



**Obr. 4:** Závislost citlivosti tyčinek a čípků na vlnové délce

Zdroj: <https://iaincarstairs.wordpress.com/2011/07/26/the-willing-pupil/> (upraveno)

## 2.3 Teorie barevného vidění

Young - Helmholtzova trichromatická teorie je založena na principu aditivního mísení barev. Trichromatické barevné vidění je odvozeno od tří typů čípků, kdy každý obsahuje jiný typ fotosenzitivního pigmentu. Mísení červené, zelené a modré barvy odpovídá všem spektrálním odstínům viditelného světla. Podrážděním těchto tří typů čípků v různých poměrech vzniká vjem jakéhokoli barevného spektra. Podle této teorie by například předmět jevící se nám jako žlutý byl výsledkem podráždění čípků nesoucích červený a zelený pigment. [12, 13]

Odlišný postoj zaujímá Heringova teorie protikladných procesů neboli protichůdných barev. Ewald Hering jako první podotknul, že neexistují barvy jako žlutomodrá nebo červenozelená. Tato teorie je založena, na rozdíl od předchozí, na existenci pouze dvou receptorových typech pro barevné vidění a jedním receptorem pro rozlišení intenzity, tedy černé a bílé. Receptory pro barevné vidění jsou tvořeny kombinací dvou rozdílných čípků. Čípky vytváří takzvanou dvojici protibarev (červené a zelené, žluté a modré), kdy na určitou vlnovou délku reaguje pouze jedna barva z dvojice. [12, 13]

## 2.4 Vidění za různých světelných podmínek

### 2.4.1 Fotopické vidění

Člověk obvykle pracuje v podmínkách za fotopického neboli denního vidění. Při fotopickém vidění je oko adaptováno na světlo, tedy na relativně vysoké hladiny jasu. Názory na spodní mez adaptačního jasu, od které je uplatněno fotopické vidění, nejsou dosud mezinárodně sjednoceny. Nejčastěji se udává, že podmínky denního vidění jsou splněny při hladinách jasu přibližně od  $3 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Fotopické vidění je zprostředkováno převážně prostřednictvím čípků, umístěných v centrální části sítnice (*macula lutea*). Tyto světločivné buňky umožňují barevné vidění. Čípky mají maximální citlivost ve žlutozelené části elektromagnetického záření, v dlouhovlnné oblasti vnímají s malou účinností tmavě červené světlo, kdežto v krátkovlnné oblasti světlo modrozelené. Při fotopickém vidění je dosažena vyšší zrková ostrost a rozlišení než za mezopických či skotopických podmínek. V současné době se téměř všechna vyšetření zrkové ostrosti provádějí za fotopického vidění při osvětlení  $85 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . [14, 15]

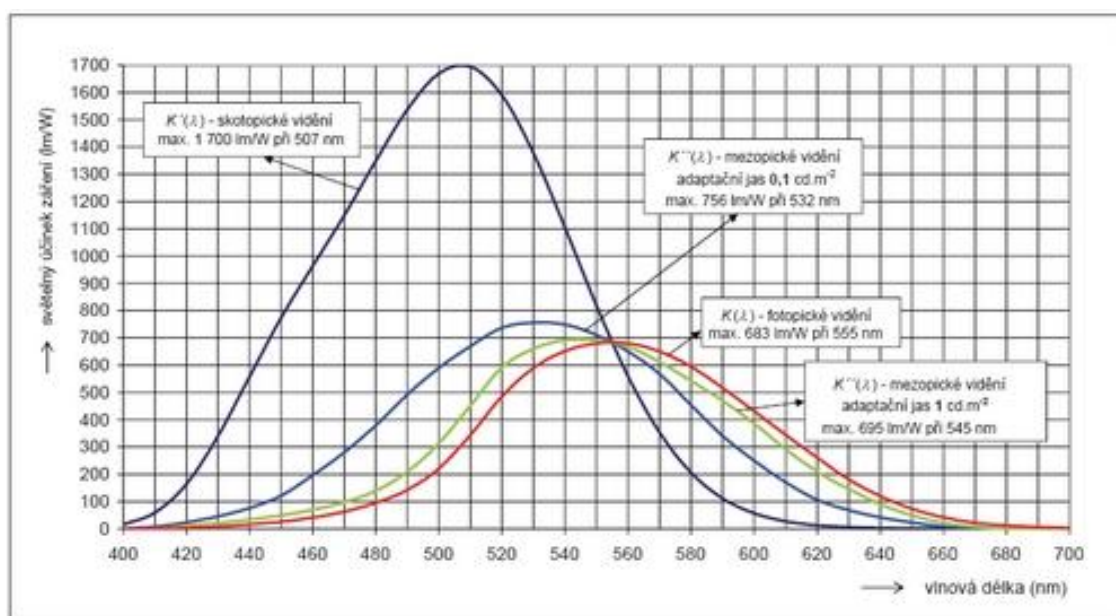
### 2.4.2 Skotopické vidění

Skotopické vidění je krajním případem činnosti zraku člověka za nočních podmínek. Na skotopickém vidění se podílí činnost tyčinek, které jsou výrazně citlivější na nízkou intenzitu světla. Tyčinky mají maximum citlivosti v oblasti modrozeleného spektra, nevnímají červené světlo, ale jsou schopné zpracovat i fialovou oblast spektra. Křivka se posouvá ke kratším vlnovým délkám (obr. 5). Tento typ fotoreceptorů, který zprostředkovává vidění, se nachází v okolí žluté skvrny a ve zbylé části periferní oblasti sítnice. Skotopické vidění je většinou spojováno s velmi nízkými hodnotami adaptačního jasu. Při tomto stavu zraku nelze rozlišovat barvy a jemné detaily jako u fotopického vidění. Uvádí se, že hodnoty jasu skotopického vidění jsou nižší než několik setin, či dokonce tisícín  $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ , tedy okolo hodnot  $0,001 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . [15, 18]

### 2.4.3 Mezopické vidění

Mezopické nebo také někdy nazývané soumravné vidění, se nachází mezi hranicí denního a nočního vidění. Podmínky mezopického vidění jsou splněny při hladinách jasu přibližně od  $0,003 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  do  $3 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Na mezopickém vidění se podílejí oba typy fotoreceptorů tedy jak tyčinky, tak i čípky. Maximální spektrální citlivost čípků se pohybuje okolo 545 nm, kdežto tyčinky mají maximum citlivosti kolem 500 nm. S klesajícím jasnem

postupně klesá citlivost čípků a zároveň se zvyšuje odezva tyčinek, To má za následek posun spektrální citlivosti ke kratším vlnovým délkám a postupné zhoršení barevného vidění a rozlišování detailů (více Purkyňův jev). Tedy pro popis mezopického vidění nestačí pouze jedna křivka popisující spektrální citlivost zraku, protože s měnící se hodnotou jasu se zároveň mění tvar i maximální hodnota křivky viz (obr. 5). V praxi se s tímto typem vidění setkáváme poměrně často, například v osvětlovacích soustavách venkovních komunikací nebo u soustav nouzového osvětlení, které pracují také na tomto principu vidění. Citlivost záření různých vlnových délek závisí na parametrech světelného mikroklimatu vytvořeného v osvětlovaném prostoru. Je tedy určována jasnem, kterému se zrak pozorovatele přizpůsobuje, tzv. adaptačním jasnem. [15, 18]



**Obr. 5:** Graf průběhů spektrálních citlivostí lidského zraku pro fotopické, mezopické a skotopické vidění [15]

### 3 Noční myopie

Noční myopie je dočasný refrakční stav oka, ke kterému dochází při zhoršených světelných podmínkách např. za šera (mezopické vidění), anebo v noci (skotopické vidění). [20, 24]

Navzdory tomu, že lidské oko má pozoruhodně vysoký rozsah schopnosti vidění v určitých intenzitách jasu, více než 10 řádů jednotek lumen, za šera se potýká se zhoršenou ostroť obrazu. I přes tento velký rozsah při snížených světelných podmínkách dochází k jevu nazývanému noční myopie. Noční myopie, jak už název napovídá, má za následek posun ohniska směrem k rohovce, což vede k následnému zhoršení vízu. [26]

Noční myopie jako fenomén zvýšených hodnot myopie za zhoršeného osvětlení, byl poprvé zaznamenán už v roce 1789. Astronom Reverend Nevil Maskelyne při sledování hvězdné oblohy zjistil, že pozorování s konkávní čočkou dosahuje vyšší ostrosti obrazu. Za objevitele noční myopie je často uznávaný Lord Rayleigh, který poznamenal: *„Zjistil jsem, že v téměř temné místnosti jsem zřetelně krátkozraký. S konkávními brýlemi je moje vidění mnohem ostřejší a zaznamenávám zvýšenou binokularitu. Na temné obloze jsou malé hvězdy mnohem zřetelnější s použitím brýlí než bez nich“*. V dnešní době, kdy proběhly výzkumy na toto téma, není dosud jednoznačně známa příčina. Pravděpodobně se nejedná pouze o jediný faktor vyvolávající noční myopii, ale o jejich vzájemnou kombinaci. [1, 26]

#### 3.1 Symptomy

Projevem noční myopie je neostrý zamlžený obraz, způsobený posunem sítnicového obrazu blíže k rohovce (viz symptomy myopie), jehož kvalita je snížena aberacemi vyšších řádů, které jsou způsobeny rozšířením pupily reagující na intenzitu světla. Nejčastěji si lidé stěžují na zhoršené vidění při řízení auta v noci a následné související oslňování protijedoucími vozidly. [1, 22]

#### 3.2 Adaptace na intenzitu světla

Pod pojmem adaptace rozumíme schopnost oka přizpůsobit se na různé hladiny okolního osvětlení. V následující podkapitole je objasněna adaptace na světlo či tmu. Součástí adaptace v různých světelných podmínkách je změna průměru zornice (pupily), proto je nejprve vysvětlen tento proces. [2]

### 3.2.1 Pupila

Duhovka (*iris*) má tvar prstence (mezikruží), ve kterém se nachází ve středu otvor zvaný zornice (*pupila*). Šíře zornice je určována činností dvou antagonisticky (protichůdně) působících hladkých svalů (dilatátoru a sfinkteru). Úkolem duhovky je vykonávat práci v podobě světelné clony. Zadní plocha duhovky je kryta pigmentovým listem, který zabraňuje vstupu světelných paprsků jinou cestou než zornicí. Prostřednictvím pupilárního reflexu se reguluje množství vstupujícího světla, aby dosahovalo optimálních hodnot. Podle momentálního množství světla se zornice buď zúží, nebo rozšíří, a tím určuje množství světla, které propustí na sítnici. [2, 6, 7]

V zadní části duhovky se nacházejí hladké svalové buňky, které ovládají průměr zornice. Svalové buňky jsou zde uloženy dvěma způsoby uspořádání:

**Svěrač zornice** (*musculus sphincter pupillae*) je tvořen cirkulárně orientovanými svalovými buňkami. Při jeho kontrakci dochází k zúžení zornice (*miosis*), a tím k omezení vstupujícího světla do oka. Sval je inervován parasympatickými vlákny z *n. ocolomotorius* (III. hlavový nerv). [2, 6]

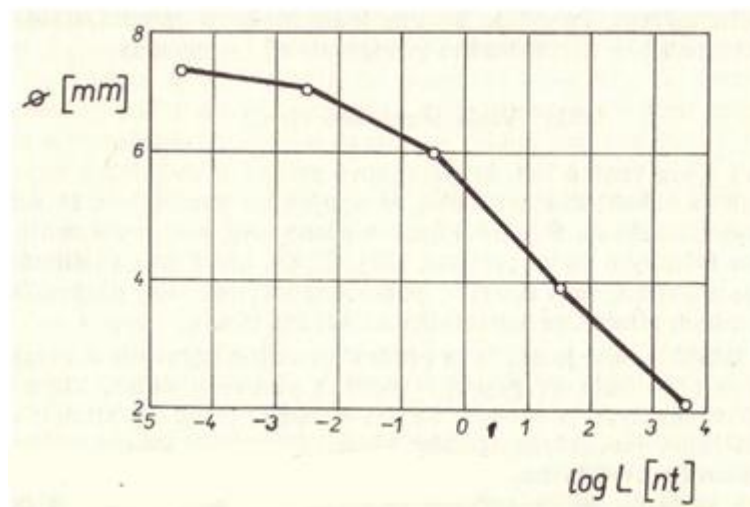
**Rozvěrač zornice** (*musculus dilatator pupillae*) tvoří radikálně uspořádané svalové buňky. Jeho kontrakce způsobuje rozšíření pupily (*mydriasis*). Tento sval je inervován sympatickými nervovými vlákny z krčního sympatiku. [2, 6]

Jak již bylo zmíněno, lidské oko se dovede přizpůsobit vnímání viditelného záření při značně různé intenzitě osvětlení. Při větších a rychlých změnách osvětlení není adaptace oka okamžitá. Oko se změněnému osvětlení přizpůsobuje různou časovou prodlevou. Tento děj je označován jako adaptace oka. Rozlišujeme adaptaci na světlo a adaptaci na tmu. [7]

### 3.2.2 Adaptace na světlo

Adaptace oka (pupily) ze tmy na světlo trvá velmi krátkou dobu, obvykle jen několik jednotek až desítek vteřin. Sítnice se jasou přizpůsobuje poněkud pomaleji. Čípky se na intenzivní světlo plně adaptují přibližně za 2 až 3 minuty. Na náhlé zvýšení intenzity osvětlení reaguje duhovka samovolným stažením. Následnou změnou průměru zornice (*miosa*) podstatně omezí množství vstupujícího světla. Tato reakce na světlo je okamžitá a chrání tím oko před oslněním. Nejmenší průměr, kterého pupila dosahuje při velké světelné intenzitě, je 2 mm. Hodnoty průměru oční pupily jsou závislé na jasě pozorovaného předmětu, což můžeme vidět na obr. 6. Důležité je také podotknout, že průměr, kterého je schopna pupila dosáhnout, se s věkem mění. Druhým způsobem, jak oko může reagovat na prudké zvýšení

intenzity osvětlení, je radikálnější obranný reflex, který se projeví sevřením očních víček a následně dojde k začlenění vstupujících světelných paprsků. [7]



**Obr. 6:** Závislost průměru oční štěrby  $\bar{\phi}$  na jasu  $L$  pozorovaného předmětu [7]

### 3.2.3 Adaptace na tmu

Adaptace na tmu je zdaleka komplikovanější než předchozí případ. Přizpůsobení oku napomáhá rozšíření zornice (mydriáza), avšak adaptační děje se odehrávají v sítnici. Jedná se o podstatně pomalejší biochemické pochody uskutečňující se regenerací a syntézou zrakových pigmentů. Podstatným činitelem u adaptace na tmu je rychlost, s jakou se snižuje intenzita osvětlení. Pokud bude docházet k pomalému snižování intenzity osvětlení, oko bude postupně hůře rozeznávat detaily předmětů, jejich barvu a tvar. Tento proces je zprostředkován právě adaptací a vede k tomu, že vidění zůstává zachováno. Pokud nastane náhlé snížení intenzity osvětlení, dojde k značnému snížení vidění až k jeho znemožnění. [2, 7]

Přechod ze světla do tmy má delší časovou prodlevu adaptace, než dosahuje adaptace na světlo. Tento proces trvá přibližně 40 až 60 minut, avšak hodnoty času jsou individuální a u některých osob je dosaženo plné adaptace ještě později. Citlivost sítnice stoupá od 1. do 5. až 8. minuty pozvolně, v této fázi se adaptují čípky, avšak přírůstek jejich citlivosti je pouze 50násobný. Od 10. do 30. minuty se rychle zvyšuje citlivost tyčinek a hodnoty citlivosti se zvýší 500násobně. Po 40. minutě se citlivost již prakticky nemění. Vyšetření adaptace se provádí pomocí adaptometru, který pracuje na principu změny osvětlení za pomoci clon a filtrů. Toto vyšetření je však časově náročné, proto byly zhotoveny nyktometry, které sledují pouze zotavení po oslnění a mají praktický význam u některých screeningových vyšetření (např. u řidičů z povolání). [2,7]

### 3.3 Příčiny noční myopie

#### 3.3.1 Akomodace

Akomodace je adaptace oka pro vidění do blízké vzdálenosti. Vyvíjí se kolem 4. měsíce společně s vývojem ciliárního svalu. Kontrakcí ciliárního svalu a uvolněním závěsného aparátu čočky se zvětšuje lomivost čočky. Akomodace je tedy schopnost oka umožňující zvýšit optickou mohutnost dioptrické soustavy oka. Tímto dějem se na sítnici zobrazí ostře předměty ležící v malé vzdálenosti před okem. S akomodací je úzce spjat proces konvergence a miózy. [1, 2, 7]

#### Stimulus akomodace

Jak již bylo řečeno, akomodaci provázejí dvě synkineze (konvergence bulbů a zúžení zornice). Konvergence umožňuje při pohledu na blízké předměty zachovat binokulárně projekci jejich obrazů do foveolární oblasti. S akomodací také podstatně souvisí velikost zornice, při pohledu do blízka se zornice zužuje ve snaze zaostřit na blízký předmět, přičemž zúžení zornice zlepšuje podmínky pro vytvoření ostrého obrazu na sítnici. Tato triáda nese označení akomodační reflex. Je zprostředkována parasymptickou inervací v Edinger-Westphalově jádru v mozku. Akomodační reflex má latenci 0,37 s. [1, 5, 6]

Akomodace je nepodmíněný reflex, jehož dráha jde cestou zrakového nervu a dále přes mozkovou kůru cestou okulomotorického nervu do ciliárního svalu. Významnou úlohu hrají chromatické aberace oka. Kratší světelné paprsky se lomí více před sítnicí než delší. Oko lépe zaostří, když se dívá na světelný podnět tvořený širším spektrem. Pokud použijeme pouze monochromatické světlo, nastává porucha akomodačního reflexu. Hloubkou ostrosti nazýváme vzdálenost, ve které se vyskytuje předmětem, aniž by se jeho obraz rozostřil. Hloubka ostrosti závisí na šíři zornice a je větší při užší pupile nebo u vzdálenějších předmětů. [6]

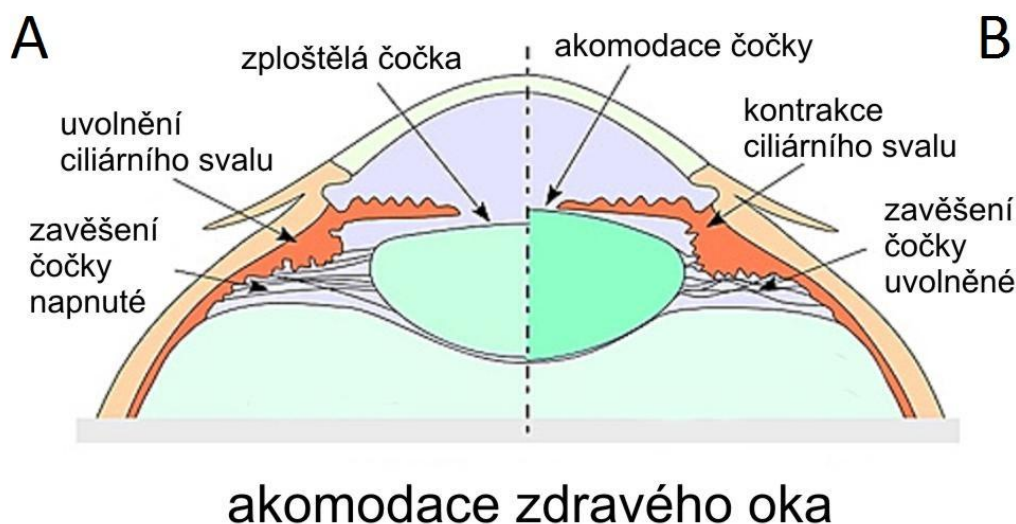
#### Mechanismus akomodace

Akomodace se skládá z aktivní složky za účasti ciliárního svalu a pasivní složky, kde se účastní čočka společně se závěsným aparátem. [7]

Ciliární sval se skládá z cirkulárních vláken (Müllerův sval) inervovaných parasymptikem a meridionálních vláken, které jsou inervované sympatikem. Kontrakce cirkulárních vláken ciliárního svalu při pohledu do blízka zužuje prstenec ciliárního svalu a tím se uvolňuje napětí zonulárního (závěsného) aparátu čočky. Čočka změní vlastní pružností



svůj tvar a polohu. Při akomodaci se předozadní průměr čočky zvětšuje. Poloměr zakřivení přední plochy čočky se tedy zmenší z původních 10 mm na 6 mm. Periferie čočky se oploští a čočka se posune poněkud dopředu. Díky tvárnému pouzdru čočky je umožněna změna lentikulárního tvaru čočky ve více sférický tvar viz obr. 7. [5, 7]



**Obr. 7:** Mechanismus akomodace (A – pohled do dálky, B – pohled do blízka)

Zdroj: <https://adithyakiran.wordpress.com/tag/presbyopia/> (upraveno)

Meridionální vlákna jsou aktivována při pohledu do dálky a pomáhají zvýšit napětí zonulárních vláken. Vlastní změna tvaru čočky je dána elasticitou pouzdra čočky a plasticitou čočkové substance. Relaxace ciliárního svalu vede k tomu, že lomivé plochy čočky se oplošťují. Se stávajícím věkem klesá elasticita pouzdra a snižuje se plasticita čočkového obsahu. Po 65. roce věku již čočka svůj tvar zpravidla nemění. [5]

Účinnost akomodace ovlivňují dva faktory. Jedním z nich je schopnost čočky měnit tvar a druhým je síla ciliárního svalu. Fyziologická akomodace vyjadřuje kontrakci ciliárního svalu, která je nutná ke změně refrakčního stavu oka o 1 dpt. [5]

Nejvzdálenější předmět, který je oko schopno vidět v relaxovaném stavu, se nazývá daleký bod (*punctum remotum*). Nejbližší předmět, který je oko schopno při maximální akomodaci stále vidět ostře, se nazývá blízký bod (*punctum proximum*). Akomodační šíře udává maximální možnou akomodační schopnost oka. Jedná se o rozdílvergence vzdálenosti dalekého a blízkého bodu. Akomodační šíře se za šera zmenšuje a daleký bod se posune blíže k oku. V dětství je akomodační schopnost největší a dosahuje až 16 dpt (i více). S přibývajícím věkem akomodační šíře lineárně klesá, což je způsobeno sníženou elasticitou

čochy a v pozdním stáří také sníženou akceschopností ciliárního svalu. Tento fyziologický stav se nazývá presbyopie. [1, 5, 19]

### **3.3.1.1 Komponenty akomodace**

Klasifikaci čtyřdílného rozdělení představil před více než 100 lety Maddox. Rozdělil akomodaci do funkčních jednotek, které dohromady tvoří statický model akomodačního systému. Heath předpokládá čtyři komponenty akomodativního procesu, mezi něž spadá: reflex, vergenční, proximální a tonická akomodace. [1]

#### Reflex akomodace

Reflexní akomodace zajišťuje zaostření obrazu na sítnici. Jejím stimulem je rozostřený pozorovaný obraz. Reflex akomodace automaticky přizpůsobí lomivost aparátu pro získání a udržení ostrého obrazu. Akomodační reflex je pravděpodobně největší a nejdůležitější složkou akomodace za monokulárních i binokulárních podmínek. [1]

#### Vergence akomodace

Je vyvolána vrozeným neurologickým propojením a současně kontrolována fúzí. Dává podnět k navození konvergence. Konvergenčně akomodativní kvocient (CA/A) se u mladých lidí rovná asi 0,40 dpt na metrový úhel. Vergenční akomodace je druhým nejdůležitějším komponentem akomodace. [1]

#### Proximální akomodace

Proximální akomodace je akomodace způsobena nepřesným vnímáním zdánlivě blízkého objektu. Je vyvolána představou vzdálenosti předmětu nacházejícího se ve vzdálenosti do 3 m. Nicméně, za normálních binokulárních podmínek je příspěvek proximální akomodace poměrně malý, přibližně 4 % až maximálně 10 %. Tato složka akomodace se může projevit při objektivní refrakci a je známá jako přístrojová myopie. [1]

#### Tonická akomodace

Na rozdíl od předcházejících tří typů u tonické akomodace není zapotřebí žádného podnětu, který by tento stav navozoval. Je tedy způsobena klidovým tonem (napětím) ciliárního svalu, kdy je oko zaostřeno na vzdálenost přibližně 1 m (až 3 m). K této složce akomodace dochází, pokud je zorné pole bez podnětu, což je např. v noci nebo v monotónním (prázdném) prostoru. Tonickou akomodaci lze měřit různými způsoby, vždy však za odstranění ostatních tří komponent. Jednou z metod je měření v zatemněné místnosti o vzdálenosti od subjektu nejméně 3 m, aby nebyly ovlivněny měřené hodnoty. Za těchto

podmínek průměrné hodnoty tonické akomodace u mladých lidí dosahují 1,00 dpt (s rozsahem až skoro do 2,00 dpt). Dříve byly průměrné naměřené hodnoty vyšší (přibližně 2,00 dpt, s rozsahem až do 4,00 dpt) z důvodu přítomnosti proximální akomodace. Tonická akomodace se snižuje s věkem. Právě tato složka akomodace je pro noční myopii zásadní. [1]

### 3.3.1.2 Akomodace a noční myopie

Jak již bylo řečeno, za snížených světelných podmínek má oko sklon přejít do klidového stavu, při kterém oko akomoduje v rozsahu 1,5 dpt. Tento stav je nazýván tonickou akomodací a podílí se na vzniku noční myopie. [6]

Podle studií je pravděpodobné, že právě tento akomodační stav způsobuje tzv. noční myopii a zhoršuje schopnost vidění. Příkladem této situace, kde hraje tato problematika značnou roli, jsou např. piloti letící hustými mraky nebo řízení auta v noci za snížené viditelnosti. Za těchto podmínek může mít zvýšená myopie vážné důsledky, pokud jde o bezpečnost. Z těchto důvodů proběhlo několik výzkumů s cílem kompenzovat tento refrakční stav prostřednictvím minusové korekce. [6, 21]

Richards (1978) měřil zrakovou ostrost za různých hodnot jasu na Snellově optotypu a stanovil optimální korekci – 0,75 dpt. Nicméně, pouze u 9% pacientů se s touto korekcí zvýšila zraková ostrost. [21]

Owens a Leibowitz (1979) provedli měření nejen ve vyšetřovně, ale také v terénním prostředí, konkrétně za noční jízdy. Zjistili, že optimální korekce odpovídá polovině dioptrické hodnoty subjektivně stanovené tonické akomodace. Avšak tyto hodnoty byly ovlivňovány jasnem noční oblohy a za zhoršeného počasí byly vyšší. Za mezopických podmínek při hodnotách jasu  $0,15 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  ze 163 testovaných subjektů vykazovaly hodnoty noční myopie  $> 0,75 \text{ dpt}$  u více než 17 %. Za skotopických podmínek  $0,001 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  se tato skupina z 17 % zvýšila na 47 % a u dalších 11 % naměřili hodnoty  $> 2 \text{ dpt}$ . Důvodem těchto rozdílných hodnot jsou právě světelné podmínky, kdy u horních hodnot mezopického vidění není dosaženo plných hodnot tonické akomodace. [21]

Potíže mohou souviset také s pomalým nástupem adaptivní akomodace. Normální odezva akomodačního reflexu za fotopických podmínek má latenci 0,37 s, avšak při zhoršených světelných podmínkách to tak být nemusí. Akomodační zpoždění se obvykle zvyšuje s klesajícím jasnem, což může způsobovat až chybu rozostření 0,3 dpt nebo i více. Navíc pro udržení blízkého vidění za špatných světelných podmínek je vyžadována vyšší aktivita akomodačního reflexu, což může vést k astenopickým příznakům. [6, 21]

Novější měření noční myopie je uskutečňováno objektivně přístrojem, který získává hodnoty pomocí infračerveného paprsku a zaznamenává hodnoty tonické akomodace (dále TA). Střední hodnoty mladých jedinců se pohybují okolo  $-0,90$  dpt. Kromě toho další studie dokládají, že hodnoty TA výrazně klesají s vyšším věkem. Tato zjištění ukazují, jakou roli hraje akomodace v noční myopii. Naměřené hodnoty pro subjektivní korekci u vzorku mladých jedinců nepřekračují  $-0,50$  dpt, a u starších jedinců jsou ještě nižší. [21]

Jedním z důvodů relativně vysokých akomodačních hodnot u mladších subjektů je tedy pravděpodobně elasticita čočky, která s rostoucím věkem klesá. Mezi další faktory, které souvisí s noční myopií, se řadí špatná adaptace na tmu a aberace oka, které jsou spojené s větším průměrem zornice při nízkém osvětlení. [21]

### 3.3.2 Purkyňův jev

Dalším jevem, který má za následek myopizaci oka ve tmě, je tzv. Purkyňův jev, který je úzce spjat s chromatickou aberací a adaptací oka na tmu. Jestliže se snižuje intenzita světla, postupně dochází ke změně relativní citlivosti oka k barvám. Maximu spektrální citlivosti oka se posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám. Za fotopických podmínek je zrak nejcitlivější na žlutozelenou barvu o vlnové délce  $545$  nm. Při skotopickém vidění je citlivost největší okolo  $500$  nm, tedy na modrozelenou barvu. Tento jev v praxi pozorujeme tak, že objekty vyzařující vlnovou délku červeného světla se nám zdají méně barevné a tmavší, kdežto objekty na opačném konci spektra, tedy modré, se jeví jasnější (viz obr. 8). Posun citlivého maxima popsal jako první J. E. Purkyně. [1, 5, 7, 19]

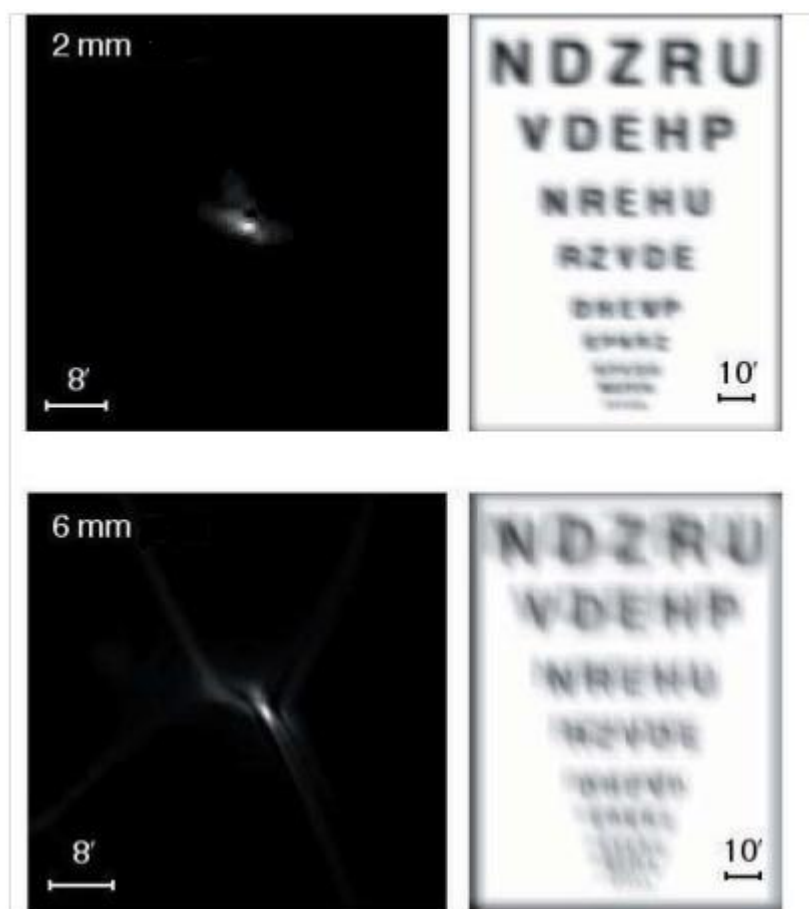


**Obr. 8:** Purkyňův jev [19]

Při nízkých hodnotách jasu se oko stává citlivější na zmíněné vlnové délky, které se vlivem chromatické aberace oka lámou na sítnici blíže k rohovce a zapříčiňují myopizaci. Dříve byl Purkyňův jev společně s chromatickou vadou považován za hlavní příčinu noční myopie. [1]

### 3.3.3 Aberace

Předmětový bod se zobrazí optickou soustavou oka na sítnici vždy neostře jako rozptylový kroužek určitého průměru. Pokud je jeho průměr menší, než je průměr čípku, je jeho obraz vnímán jako ostrý. Rozptylový kroužek je způsoben aberacemi, jimiž je zatížena optická soustava každého oka. Aberace vyšších řádů jsou závislé na velikosti pupily. V určitém rozmezí je průměr rozptylového kroužku přímo úměrný velikosti pupily. Velikost aberací klesá s užší zornicí. Aberace vyšších řádů jsou příčinou sníženého vizuálního kontrastu a zhoršeného vidění za snížených světelných podmínek. [7, 22]

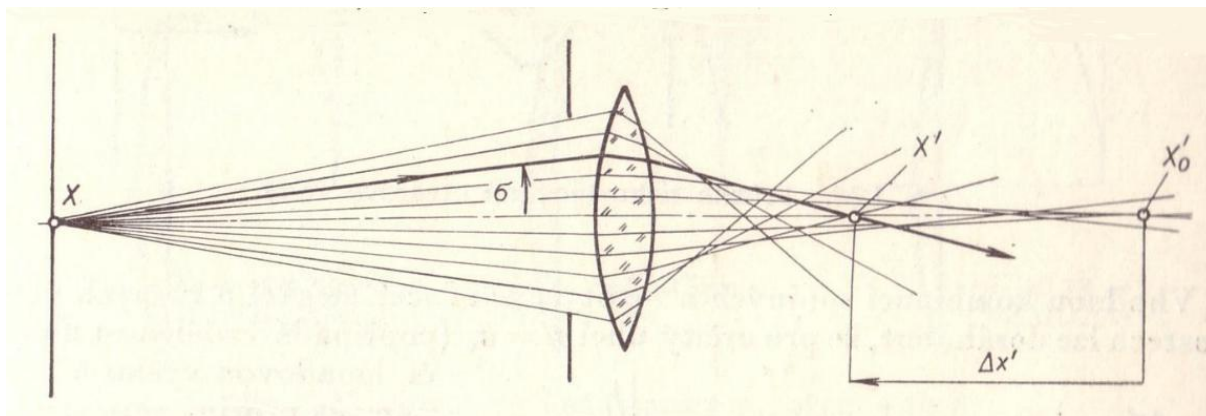


**Obr. 9:** Simulované sítnicové obrazy oka a optotypy pro dva průměry pupily (2mm, 6mm) [20]

### 3.3.3.1 Sférická vada

Sférická aberace, též nazývaná otvorová vada, vzniká při zobrazení osového bodu optickou soustavou oka širokým paprskovým svazkem. Svazek monochromatických paprsků, vycházející z bodu na optické ose a dopadající na čočku, neprotíná optickou osu v jediném bodě. To je způsobeno tím, že rovnoběžné paprsky jsou periferními oblastmi čočky lámány více a tyto paprsky se sbíhají před ohniskem parciálních parsků (viz obr. 10). [1, 7, 9]

Ve výsledku se sférická vada projeví tak, že obrazem bodu není bod, ale kulová plocha. Sférická aberace způsobuje neostrost obrazu, proto je žádoucí tuto vadu korigovat nebo alespoň zmenšit. Otvorová vada je v oku redukována menším zakřivením periferní rohovky, vyšším indexem lomu čočkového jádra (ve srovnání s kortexem) a obvykle relativně úzkou zornicí. Změna velikosti zornice se značně podílí na sférické aberaci a změně akomodačního stimulu. Zrakový aparát reaguje na sférickou aberaci způsobující neostrý obraz na sítnici přehnanou akomodací. Hodnoty sférické aberace byly obecně nižší než 1,00 dpt. Experimentálním měřením byly zjištěny hodnoty prokazující, že sférická aberace se nemění s velikostí zornice pro blízkou vzdálenost. [1, 7, 9]



**Obr. 10:** Sférická vada při zobrazení předmětu z konečné vzdálenosti [7]

Je-li  $X'_0$  paraxiální obraz předmětového bodu  $X$  a  $X'$  obraz vytvořený paprsky, které svírají s osou úhel  $\delta$ , nazývá se vzdálenost  $\Delta x'$  otvorová vada, příslušná otvorovému úhlu  $\delta$ . [7]

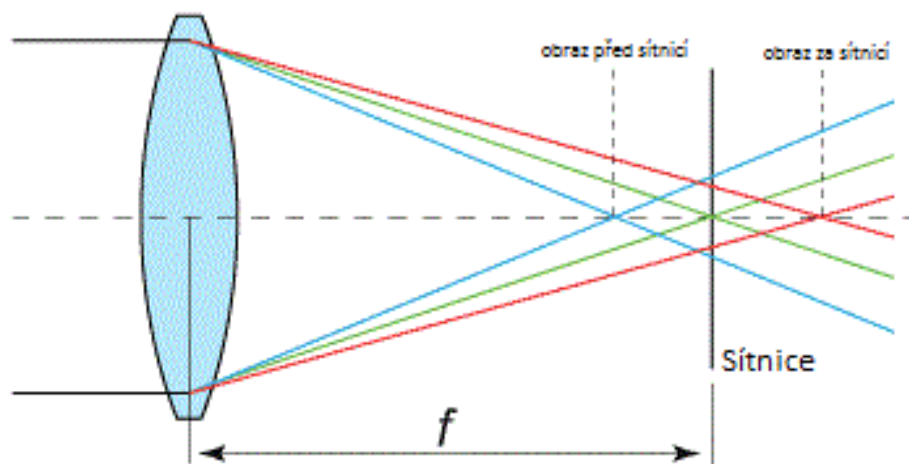
Sférická vada významně posouvá sférickou komponentu směrem do „plusu“ nebo „mínusu“ při subjektivní i objektivní refrakci v závislosti na osvětlení (průměr pupily). Za zhoršených světelných podmínek nastává rozšíření zornice, což vede k zvětšení sférické vady

a tedy i výraznému zhoršení vidění. Některé studie uvádějí, že právě sférická vada je nejčastější příčina noční myopie. [1, 22]

### 3.3.3.2 Chromatická vada

Na vzniku noční myopie se podílí také chromatická aberace, sice podstatně méně než předchozí sférická aberace, ale také přispívá k neostrému obrazu za zhoršených světelných podmínek. [1]

V praxi se na zobrazení podílí složené (bílé) světlo, které je souborem monochromatických světél o různých vlnových délkách. Optické prostředí oka má pro různé vlnové délky různý index lomu. Čočka při zobrazení předmětu bílým světlem vytvoří tolik obrazů, kolik jednoduchých světél obsahuje světlo, vysílané předmětem (viz obr. 11). Obrazy vytvořené jednotlivými vlnovými délkami světla leží v jiném místě a mají různou velikost. Tyto vlastnosti se označují jako barevná vada polohy a velikosti. Krátkovlnné modré světlo má ohnisko blíže než dlouhovlnné červené světlo. To znamená, že emetropické oko se stává hypermetropické pro červenou a myopické pro modrou barvu. Žlutozelené světlo, na které je lidské oko za fotopických podmínek nejcitlivější, je fokusováno na sítnici. Interval chromatické aberace lidského oka je 1,25 dpt. [1, 7, 9]



**Obr. 11:** Chromatická aberace

Zdroj: [http://fotoroman.cz/glossary/2\\_barevna\\_vada.htm](http://fotoroman.cz/glossary/2_barevna_vada.htm) (upraveno)

Jak již bylo zmíněno za snížených světelných podmínek je lidské oko citlivější na vlnové délky modrého světla (viz Purkyňův jev). Tento posun může mít za následek, že dochází k myopizaci. [20]

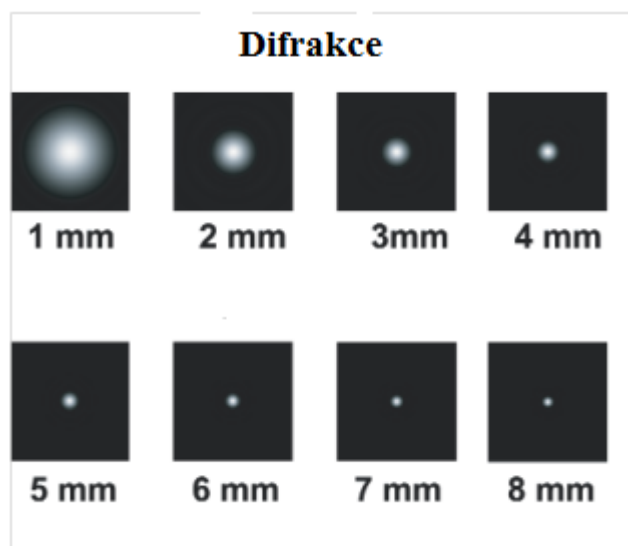


### 3.3.3.3 Koma

Stejně jako předcházející aberace i tato je vyvolaná změnou velikosti pupily v závislosti na úrovni osvětlení. Popisuje zobrazení šikmých paprsků přes optický systém vyúsťující v neostrý obraz. Tato aberace není rotačně symetrická. Ztěžuje konečné sférické hodnoty měřené při subjektivní refrakci. Má neblahý vliv na vidění, způsobuje neostrý obraz, který je připodobňován k „duchům“, lidé si také stěžují v noci na záři od světel aut. Tato vada může vzniknout nepravidelnou optickou soustavou při narušení rohovky například laserovou operací. Dalším možným vysvětlením vzniku této vady by mohla být špatná rotační symetrie rohovky anebo čočky, která indukuje asymetrickou aberaci v podobě koma. Název vady pochází od vzniklého obrazu, který svým tvarem připomíná kometu s chvostem. [7, 20, 22]

### 3.3.3.4 Difrakce

Difrakce nebo také nazývaný ohyb světla vzniká po průchodu světla úzkým kruhovým otvorem, což je v případě oka pupila. Čím je zornice optického systému větší, tím dochází k menšímu ovlivnění kvality obrazu difrakcí. Naopak, čím menší je průměr zornice, tím více difrakce degraduje kvalitu obrazu. Tento jev je znázorněn na obr. 12. Tento stav vysvětluje situaci, proč lidé s velmi úzkou pupilou zaznamenávají nekvalitní vidění. [20]

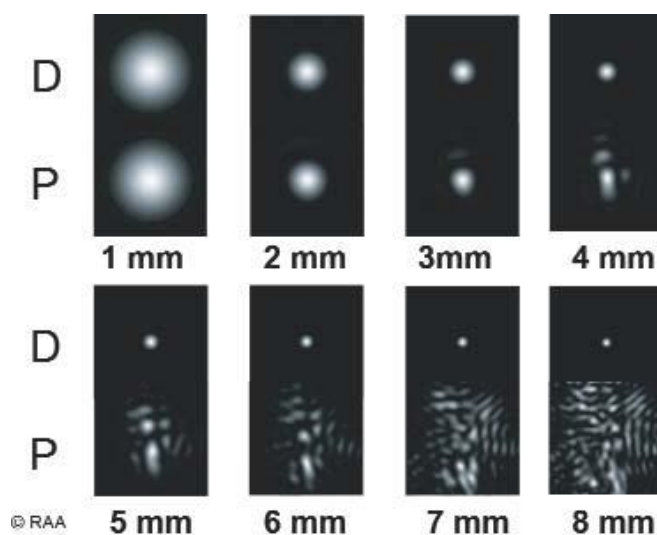


Obr. 12: Difrakce v závislosti na průměru zornice [20]

Jak je možné vidět na obr. 13, u normálního oka, které je korigováno sférickou a cylindrickou korekcí, tedy s kompenzovanými aberacemi druhého řádu, se začíná zhoršovat kvalita obrazu při průměrech zornice vyšších než 3 mm. To je jedním z důvodů, proč si lidé



stěžují na kvalitu vidění v mezopických podmínkách, kdy jsou jejich zornice rozšířené. Z toho vyplývá, že optické vady, které jsou za normálních okolností maskované malým průměrem zornice, se nyní projeví. [20]



**Obr. 13:** Difrakce v závislosti na průměru zornice a refrakční vadě [20]

Horní řádek označený písmenem D znázorňuje závislost difrakce na průměru zornice bez brýlové korekce (emetrop). Spodní řádek, který je označen písmenem P uvádí simulaci pro oko s optimální brýlovou korekcí. Podle studií se vada projevuje od průměru pupily s hodnotou 3 mm, jak je možné pozorovat na obrázku. [20]

### 3.4 Vyšetření noční myopie

Noční myopie byla poprvé popsána v průběhu 18. století, ale příčina tohoto jevu zůstává dodnes kontroverzním tématem. I přes mnoho teorií, jako již zmiňovaná akomodace či sférická a chromatická aberace, doposud nebylo stanoveno konečné vysvětlení jejího vzniku. Taktéž nebyly stanoveny jasné formy vyšetřovacích metod této refrakční vady. [1, 23]

#### 3.4.1 Objektivní refrakce

Objektivní vyšetření pracuje na principu měření lomivosti oka prostřednictvím specializovaného přístroje. Objektivní refrakce je prováděna tedy přístrojem bez spolupráce nebo subjektivního posouzení vyšetřovaného. Avšak tento typ refrakce není vždy přesný. V optometrii slouží jako výchozí bod, pro stanovení přibližné korekce a optimální korekce je vyšetřována využitím subjektivní metody. Objektivní metody měření by v budoucnu mohly pomoci při stanovení hodnot jednotlivých složek podílejících se na vzniku noční myopie a definitivně odhalit příčinu této problematiky.

V současnosti se objektivně noční myopie měří jen experimentálně na upravených přístrojích. Dosud není navržen objektivní přístroj speciálně určený pro vyšetření noční myopie. Následující studie (P. Artal, C. Schwarz, C. Cánovas, A. Mira-Agudelo) představuje objektivní vyšetření dané problematiky.

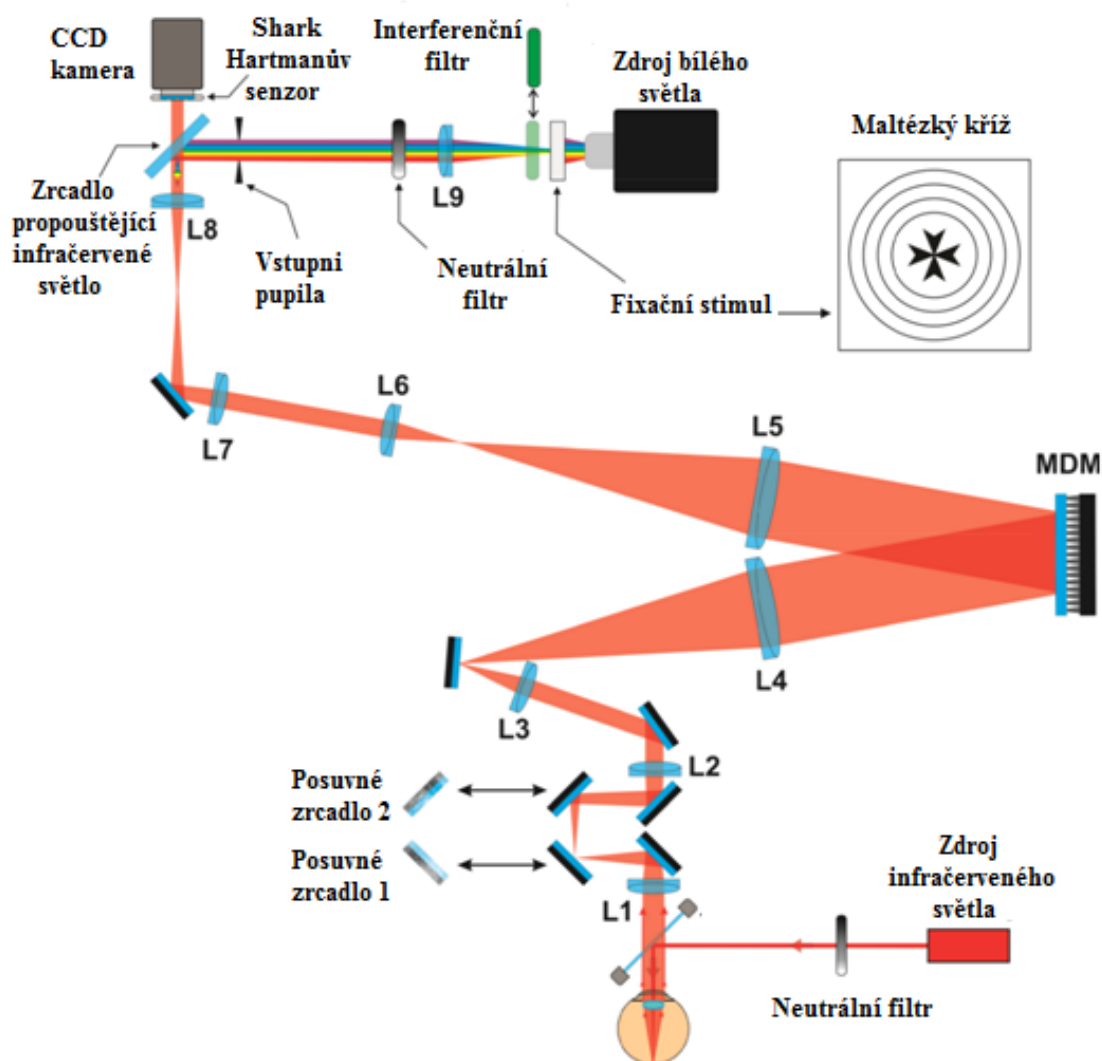
#### Experiment objektivního vyšetření noční myopie

Za pomoci Badalova optometru byl změřen nejen rozsah noční myopie, ale byly také zjištěny její hlavní příčiny. Experiment byl opakován za různých světelných podmínek, které způsobovaly sférické a chromatické aberace oka. Měření probíhalo na různých úrovních jasu, z výchozích  $20 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  až k nejnižším jasům  $22 \cdot 10^{-6} \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Přídavným zařízením adaptivní optiky byly kontinuálně měřeny aberace oka pomocí 1050 nm Shack-Hartmannova aberometru, který pracuje na principu snímání infračerveného světla. [26, 27]

Byly naměřeny velmi různorodé dioptrické hodnoty noční myopie. Průměrně byl myopický posun stanoven na  $-0,8 \text{ dpt}$  za nízkých hodnot jasu skotopického osvětlení. Za hlavního činitele, který byl zodpovědný za vznik noční myopie, byla stanovena akomodace. Další faktory, které tomuto stavu přispívají, jsou již očekávané chromatické a sférické aberace, avšak s daleko menším vlivem než bylo očekáváno. [26, 27]

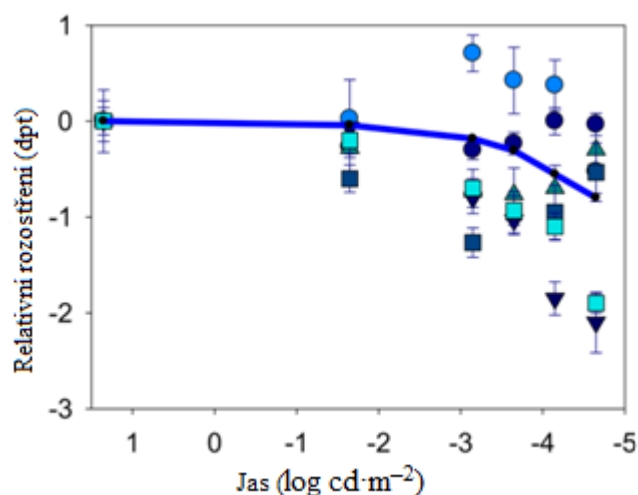
Badalův optometr se skládá z jedné spojné čočky a pohyblivé testové značky. Vyšetřovaná osoba posouvá pohyblivou testovou značku směrem k objektivu, dokud nedojde k jejímu zaostření. Tato poloha odpovídá dalekému bodu soustavy oka. Podle dalekého bodu je následně možné po odečtení optické mohutnosti objektivu stanovit refrakci oka. Aby nedocházelo ke změně velikosti retinálních obrazů, čočka soustavy je umístěna tak, aby se její ohniskový bod shodoval s uzlovým bodem oka a tím bylo zabráněno nepřesnému měření. [26, 27]

Použitý Badalův optometr v testování je poněkud upraven (obr. 14). Obsahuje prvky adaptivní optiky, Shack-Hartmanův senzor pro měření aberací a navozené akomodace. Soustava se dále skládá z deformovatelného adaptivního zrcadla, které je využito ke korekci aberací. Dále obsahuje zdroj infračerveného záření o vlnové délce 1050 nm a zdroj bílého světla. Úzký infračervený paprsek se promítá na sítnici vyšetřovaného. Díky tomu, že tato vlnová délka není lidským okem viditelná, měří hodnoty myopie, aniž by rušila vyšetřovaného. Světlo se následně odráží od sítnice a prochází zpět optickým systémem, kde je následně zaznamenáno na CCD kameře (C5999, Hamamatsu, Japonsko), a na základě obrazu je vyhodnocena aberace. Dále je obsahuje vhodné sady čoček L1-L9, které mají vliv na přenos infračerveného světla k senzoru. Jako testovací značka byl použit Maltézský kříž za stropního osvětlení v podobě xenonové lampy (C7535/C4251, Hamamatsu, Japonsko). Testovaná osoba pak nastavuje pozici dvou posuvných zrcadel (PZ1, PZ2) tak, aby byla testovací značka subjektivně zaostřena. [26. 27]



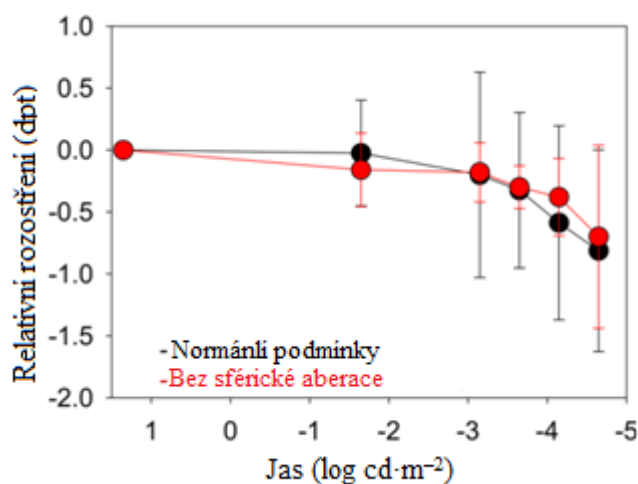
**Obr. 14:** Schéma modifikovaného Badalova optometru [26 - upraveno]

Pro navození požadovaného jasu byla použita sada neutrálních filtrů. Byly vybrány následující podmínky jasu stimulu: 1,35, -1,64, -3,14, -3,64, -4,14 a -4,64 log ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ), viz obr. 15. Tento rozsah jasu sahá od fotopického osvětlení ( $20 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ) až do skotopických podmínek ( $22 \cdot 10^{-6} \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ). Před měřením za skotopických podmínek probíhala adaptace na tmu po dobu 30 minut. [26]



**Obr. 15:** Graf relativního rozostření obrazu (dpt) v závislosti na jasu stimulu ( $\log \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ) [26 - upraveno]

Výsledky jednotlivých testovaných osob jsou odlišeny pomocí různých geometrických znaků, plná čára spojuje průměrné hodnoty získané za různých jasů. [26. 27]



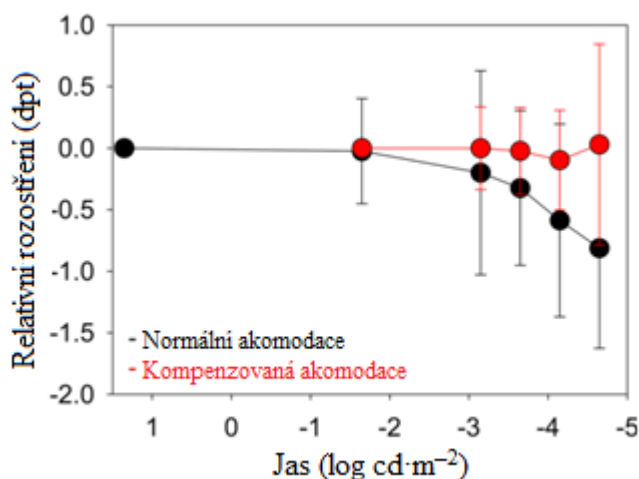
**Obr. 16:** Graf závislosti rozostření obrazu (dpt) na jasu ( $\log \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ) vlivem sférické aberace [26 - upraveno]

Graf znázorňuje závislosti průměrného relativního rozostření na jasu stimulu s korigovanou sférickou aberací (červené body) a bez korekce sférické aberace (černé body). [26, 27]

Tímto experimentem bylo jednoznačně zjištěno, že sférická vada není hlavní příčinou noční myopie, jak se v některých studiích domnívali. Jak je možné vidět na obr. 16, vynesené

hodnoty na grafu byly téměř totožné. Z toho vyplývá, že sférická aberace nehraje významnou roli v noční myopii. [26, 27]

Vliv chromatické aberace byl hodnocen porovnáním výsledků měření s bílým světlem a monochromatickým světlem. Průměrné výsledky neprokázaly žádné rozdíly pro všechny úrovně jasu. V experimentu byla chromatická aberace zjištěna výpočtem, kdy byla vlnová délka posunuta o 43 nm do modré oblasti spektra, to by pro model oka odpovídalo myopickému posunu  $-0,2$  dpt. Není pochyb o tom, že chromatická aberace oka v kombinaci se sférickou aberací, může vyvolat malé rozostření obrazu při nízkém jasů. Nicméně, tyto hodnoty jsou tak nízké, že nevysvětlují vznik noční krátkozrakosti. [26, 27]



**Obr. 17:** Graf závislosti rozostření obrazu (dpt) na jasů ( $\log \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ) vlivem akomodace [26 - upraveno]

Graf na obr. 17 znázorňuje průměrné hodnoty relativního rozostření v závislosti na jasů. Body znázorňují průměrné hodnoty akomodace, kdy byla akomodační chyba kompenzovaná (červené body), ve srovnání s případem, kdy byla akomodace přítomna (černé body). [26, 27]

Akomodace byla stanovena jako hlavní příčina vzniku noční myopie. Ačkoliv výsledky experimentu byly v některých částech sporné (při kompenzované akomodační chybě by měly hodnoty noční myopie dosahovat nižších výsledků, než naměřil experiment), po celkovém posouzení bylo potvrzeno, že mechanismus akomodace je hlavním faktorem odpovědným za noční myopii. [26, 27]

Měření bylo prováděno monokulárně na 8 subjektech. Rozsah věku byl od 24 do 49 let (průměr 33 let). Průměrná sférická vada brobandů byla  $-1,1$  dpt a cylindrická vada  $-0,2$  dpt. Všechna měření byla prováděna za přirozené velikosti zornice, tedy bez použití cykloplegie. Přirozený průměr zornice byl stanoven na 6 mm (průměr se lišil při různých hodnotách jasu). Pro průměr pupily 6 mm byla naměřena průměrná sférická aberace  $0,15\ \mu\text{m}$ . [26, 27]

Hodnoty noční myopie byly velmi rozdílné, bylo naměřeno od 0 dpt do  $-2,1$  dpt. Pro nejnižší hodnoty jasu byl naměřen průměrný myopický posun  $-0,81$  dpt. U skotopických podmínek za jasu  $0.00022\ \text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$  byl průměrný myopický posun jen  $-0,32$  dpt. U jednoho subjektu byl dokonce naměřen malý hypermetropický posun. Polovina pacientů nepocítovala významnou změnu ostrosti při změně jasu v skotopických podmínkách. [26, 27]

### 3.4.2 Subjektivní refrakce

V současnosti je možné vyšetřovat noční myopii subjektivně na bodovém testu, tzv. White point testu. Prozatím je to jeden z mála testů určených pro vyšetření této vady, ale na některých LCD optotypech a také PolaSkopu 3D lze vyšetřovat podle klasického optotypu s inverzním zobrazením. [19]

Před tímto vyšetřením je pochopitelně nutné nejprve stanovit subjektivní refrakci do dálky, společně s binokulárním vyvážením a popřípadě korekcí heterofonie. [19]

#### 3.4.2.1 White point test

Noční myopie za pomoci „white point testu“ se vyšetřuje v zatemněné místnosti, kde je subjekt nejméně 20 minut adaptován na světelné podmínky. Po adaptaci oka na tmou je vyšetřovanému zobrazen optotyp. Adaptace není zcela nezbytná, pokud se jedná o vyšetření a stanovení dioptické hodnoty do běžného silničního provozu, není potřeba subjekt na tmou adaptovat. Pokud se po předložení white point testu noční myopie projeví, vyšetřovaný neuvidí ostrý bodový zdroj světla, ale okolo bodu rozptýlené světlo, tzv. glare (záře), které je znázorněno na obr. 18. Test je nejčastěji prováděn za binokulárních podmínek, existují však studie, kdy je měřena noční myopie i monokulárně. Předkládáme před obě oči konkávní čočku o hodnotě  $-0,25$  dpt, dokud vyšetřovaný nevidí obraz ostře. Pomocí tohoto testu se míra korekce pohybuje mezi  $-0,25$  až  $-0,75$  dpt, avšak ve výjimečných situacích se hodnoty můžou dostat k  $-2,5$  dpt a více. Stejně jako při měření myopie korigujeme nejslabší možnou rozptýlnou čočkou pro získání ostrého obrazu. [19]



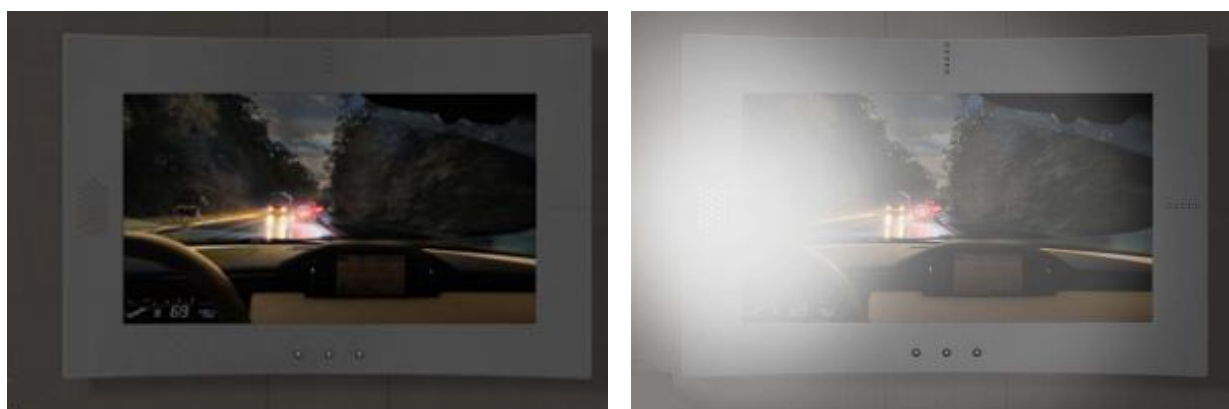
**Obr. 18:** White point test (A – rozptýlený bod před korekcí, B – ostrý bod po korekci)

### 3.4.2.2 PolaScop 3D

Vyšetření noční myopie je možné také na zmíněném „PolaSkopu 3D“, který navíc díky aktivnímu rámu dokáže simulovat oslnění. Díky tomu lze pomocí barevných LED diod změřit a demonstrovat noční myopii. [24]

#### Test oslnění

V tomto testu je simulován noční silniční provoz společně se zdrojem oslňujícího světla, které představuje protijedoucí vozidlo (viz obr. 19). Vyšetřovaný posuzuje, jak silné oslnění pociťuje při předsazování korekce. [24]



**Obr. 19:** Test oslnění [24]



### Subjektivní měření noční myopie

Existují autorefraktometry, které jsou schopné naměřit hodnoty noční myopie, avšak ty stanoví pouze objektivní refrakci. Subjektivní měření nese několik výhod. Vyšetřovaný sám vidí, zda a o kolik se zhorší jeho vidění za nočních podmínek. Optometrista zároveň může stanovit odpovídající korekci, která poskytuje lepší vidění v noci. [24]

V zatemněné místnosti se posuzují rozostřené kruhy různých barev, např. semaforu (viz obr. 20) a následně jsou pacienti pro danou světelnou situaci korigováni. Test je také možné přepnout pro spektrum červené, zelené a modré barvy. [24]



**Obr. 20:** Test noční myopie [24]

Vyšetřovaný je dotazován, zda jsou světla ostrá a ostře ohraničená. Subjekt uvede, zda jsou určité barvy rozmazané. Z důvodu chromatické aberace vyšetřovaný vždy uvidí červené světlo nejlépe a zelené nejhůře. Jsou-li barvy rozmazané, např. žlutá mírně rozmazaná a zelená silně rozmazaná, korigujeme minusovými čočkami tak dlouho, dokud vyšetřovaný neuvidí všechny barvy ostře. Test je prováděn binokulárně a u obou očí je přidávána stejná korekční hodnota. [24]

Podle následující studie není zanedbatelné, na jakém typu testu je subjektivní refrakce vyšetřována. Noční myopie nabývá také rozdílných hodnot při subjektivním a objektivním měření.

Experiment z roku 2012 (López-Gil, Peixoto-de-Matos, Thibos, González-Méijome) měřil hodnoty noční myopie subjektivní i objektivní metodou, při kterém byly sledovány dva druhy stimulů v podobě černých písmen na světlém pozadí a bodový zdroj světla na tmavém pozadí (white point test). S testem v podobě bodového zdroje světla na tmavém pozadí se

setkáváme v praxi daleko častěji. Simuluje podmínky noční myopie, kdy je oko nuceno více akomodovat. Díky této studii bylo zjištěno, že naměřené hodnoty jsou výrazněji myopické při bodovém zdroji na tmavém pozadí (white point test) ve srovnání s inverzním typem optotypu. Tato studie se domnívá, že akomodace je způsobena převážně v důsledku sférické aberace. Výsledky naznačují, že významná část noční myopie je dána typem vizuálního stimulu. [23]

Pro objektivní měření byl použit autorefraktometr WAM5500 (Grand Seiko Hiroshima, Japan), který prostřednictvím zrcadla odráží infračervené světlo (850 nm). Stejný přístroj také měří průměr zornice, který se pohyboval okolo 2,5 mm. Vizuální podmět byl buď bodový zdroj (LED diody) při intenzitě světla 70 mcd nebo černá písmena na bílém pozadí se svítivostí  $200 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Jas spektra LED a písmen optotypu byl podobný. V průběhu sběru dat byla místnost zatemněna, aby simulovala podmínky nočního vidění s přirozeným rozšířením pupily. Na závěr experimentu byly změřeny aberace vyšších řádů s uvolněnou akomodací. Měření probíhalo na Shack-Hartmannově aberometru (Irx3, Imagine Eyes, Orsay, Francie). Koeficienty byly odhadnuty na průměr zornice 5 mm (vždy větší než 5 mm). [23]

Pro představu následujícího vyšetřovacího postupu jsou zde uvedeny výsledné hodnoty a závěry měření:

Experiment byl prováděn na emetropech s věkem  $21,9 \pm 4,6$  let a sférickým ekvivalentem menším než  $\pm 0,375$  dpt. Pouze jeden subjekt vykazoval podobný refrakční stav pro oba podměty. Přestože vzorek populace byl emetropický bez klinických nálezů byly naměřeny hodnoty i mírně hypermetropické ( $+0,09$  dpt při měření na optotypu s písmeny). Naopak značně myopické hodnoty vyšly u testování bodového zdroje (white point testu). Průměrné hodnoty subjektivního měření byly stanoveny na  $-0,81$  dpt. Jinými slovy, refrakční stav průměrného emetropického oka v tomto testování vychází výrazně myopický u bodového zdroje ve srovnání se stimulem v podobě písmen. Při objektivním měření na autorefraktometru jsou zaznamenávány taktéž více myopické hodnoty u bodového stimulu (průměrné hodnoty  $-0,41$  dpt). [23]

Dalším způsob měření, je použít místo white point testu alternativní testovací znak v podobě písmene, který je stejně jako zmíněný test zobrazen v bílém provedení na tmavém podkladě. Díky studii z roku 2015 bylo zjištěno, že použitím jiného optotypu na principu inverzního zobrazení klasického optotypu (konkrétně písmena O a E), se výsledné hodnoty noční myopie od white point testu statisticky výrazně neliší. Z toho tedy vyplývá, že za použití optotypu s inverzním zobrazením hodnot, jsme schopni v praxi měřit subjektivně hodnoty noční myopie i na jiném typu optotypu než je white point test. [17]

### 3.5 Korekce noční myopie

Primárním řešením této problematiky by měla být vhodná dioptrická korekce na základě subjektivní refrakce posunuta směrem do mínusu v závislosti na velikosti noční myopie. Avšak novinkou v korekci noční krátkozrakosti jsou univerzální brýle pro noční řízení se stejnou hodnotou degrese pro všechny, nezávisle na míře této vady. Další variantou je použití různě barevných filtrů. Zatím však nebylo zjištěno, zda se v případě tohoto typu korekce jedná pouze o podpůrný charakter, nebo zda může být samostatnou metodou. Mimo jiné se můžeme sférické vadě vyhnout pomocí asférických ploch nebo popřípadě zvolit individuální brýlové čočky. Součástí korekce by měla být také antireflexní vrstva, která vyruší parazitní paprsky, sníží míru disperze a tedy i vliv barevné vady. [19, 25, 28, 29]

V současnosti je korekce noční myopie speciálně pro řidiče předmětem marketingu v mnoha firmách. Otázkou je, jak stanovit hodnotu korekce noční myopie, aby vyhovovala všem. Zda je vhodné mít jedny brýle pro denní nošení a druhé pro noční, či zvolit jednotnou variantu. Například brýlové čočky od firmy Zeiss s názvem DriveSafe jsou speciálně optimalizovány nejen pro tmu (skotopické vidění) a šero (mezopické vidění), ale i pro denní užití. Tento typ čoček byl tedy vyvinut pro celodenní nošení. Dalším typem možností korekce jsou čočky EyeDrive od firmy Essilor. Noční odrazivost je až o 90 % nižší než u konvenčních plastových čoček bez antireflexní vrstvy (index 1,6) a o 57 % nižší než u několikavrstvých antireflexních čoček, které jsou v současnosti k dispozici na trhu. Tento typ čoček pracuje na principu redukce o 0,4 dpt v horní části brýlové čočky. [25, 29, 30]

Korekce noční myopie je podstatná především pro řidiče motorových vozidel. Směrnice o zrakové ostrosti stanovuje pro skupiny A, B, C, E a T oboustranný (binokulární) vizus 5/7,5 po eventuální korekci. Za tmy či šera výrazně klesá schopnost lidského oka vnímat jednotlivé objekty a jejich pohyb. Stanovený vizus 5/7,5 v noci ještě klesá a riziko vzniku nehod tím několikanásobně roste. [9]

Nejoptimálnějším řešením korekce noční myopie by byly noční brýle, které by odpovídaly dané subjektivní refrakci klienta. Jednalo by se o stávající korekci, která by byla posunuta k minusovým hodnotám. To by zamezovalo případnému překorigování v denních podmínkách, či podkorigování v nočních podmínkách v případě pouze jedné brýlí. Noční brýle by byly doplněny povrchovými úpravami a vhodnými barevnými filtry.

## 4 Experimentální část

### 4.1 Cíl práce

Experimentální část bakalářské práce je zaměřena na rozdíly refrakčního deficitu za různých světelných podmínek. Prvotním úkolem bylo vytvořit adekvátní protokol pro vhodnou evidenci dat. Následně změřit nejméně 50 probandů za tří různých typů vidění (fotopické, mezopické, skotopické). Poslední část práce zahrnovala všechna naměřená data statisticky zpracovat a následně vyhodnotit.

### 4.2 Metodika

#### 4.2.1 Vyšetřovna a použité vybavení

K provedení experimentální části byla využita vyšetřovací laboratoř optiky a optometrie Fakulty biomedicínského inženýrství v Kladně.

Pro měření byl použit autorefraktokeratometr 400 Essilor, LCD optotyp Polaopto 1001P, zkušební brýlová obruba společně se zkušební brýlovou sadou čoček, vyšetřovací křeslo a automatický fokometr. Dále bylo využito speciálních brýlí s filtry, které navozují mezopické vidění, zapůjčenými společnostmi MEDICEM Institute.

#### 4.2.2 Pracovní a světelné podmínky

Subjektivní vyšetření jsem provedla na LCD optotypu ze vzdálenosti 6 m. Z důvodu navození vždy přibližně stejných světelných podmínek bylo využito rolet ve vyšetřovací místnosti. Stanovení subjektivní refrakce bylo prováděno za umělého osvětlení, které bylo měřeno prostřednictvím luxmetru. Hodnoty osvětlení závisejí nejen na samotném osvětlení, ale také na vzdálenosti od zdroje záření, proto bylo osvětlení kontrolováno vždy z místa vyšetřovací jednotky. Průměrné hodnoty osvětlení odpovídaly 336 lux a jas LCD optotypu byl  $87,17 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  (neoptimálnější jas optotypu by odpovídal hodnotě jasu  $85 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ , to však nebylo možné navodit, proto jsem zvolila nejbližší hodnotu korespondující s touto normou).

Každý typ měření za rozdílných světelných podmínek probíhal při stejné hodnotě jasu LCD optotypu. Tedy při navození fotopického vidění byl subjekt vyšetřován za hodnot osvětlení průměrně 336 lux a jasu optotypu již zmíněných  $87,17 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Pro navození mezopického vidění byly zachovány stejné světelné podmínky jak osvětlení, tak jasu optotypu

s tím rozdílem, že vyšetřovanému byly nasazeny na zkušební obrubu speciální brýle navozující mezopické vidění. Tyto brýle byly navrženy tak, aby navodily jas optotypu na  $3 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  (odpovídá mezopickému vidění) při hodnotě jasu optotypu  $85 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Při třetím typu refrakce, kdy bylo vyšetřováno vidění za skotopických podmínek, byla zatemněna okna, aby refrakci nerušilo pouliční osvětlení a v místnosti byly vypnuty všechny světelné zdroje kromě LCD optotypu. Použitý luxmetr měřil osvětlení s přesností pouze na dvě desetinná místa, proto jedinou podmínkou pro dané měření bylo, aby se na displeji nezobrazila hodnota vyšší než 0,1 lux.

Měření noční myopie probíhalo vždy v pozdních hodinách, kdy byly odpovídající světelné podmínky pro všechny tři typy vyšetření. Refrakce musela probíhat po západu slunce, protože použité rolety přes den nefungovaly zcela jako clona a navozovaly spíše mezopické než skotopické vidění. Z tohoto důvodu jsem nebyla schopna zajistit skotopické podmínky přes odpolední hodiny a měření muselo probíhat večer nejdříve po 18. hodiny do 24. hodiny. To mohlo mít vliv na únavu probandů a způsobit mírné změny při stanovení korekce. Měření probíhalo průměrně 1 hodinu a skládalo se ze tří dílčích měření.

### **4.2.3 Průběh měření**

#### **4.2.3.1 Anamnéza**

Každému vyšetření předcházela důkladná anamnéza, která byla v mé výzkumné práci rozšířena otázkami na noční myopii a s ní spjaté symptomy. Subjekty byly dotazovány na vidění nejen v noci, ale také na možné obtíže za šera. Do anamnézy byly zahrnuty také otázky na diskomfort při řízení v noci a související nepříjemné oslnění od protijedoucích aut. V souvislosti s anamnézou byli probandi dotazováni na sílu stávající korekce v jiných než denních světelných podmínkách. Díky anamnéze, zaměřené na noční myopii, bylo předběžně možné usoudit podle symptomů vyšetřovaného, zdali trpí noční myopií způsobující komplikace, či nikoliv.

#### **4.2.3.2 Objektivní refrakce**

Před subjektivním měřením jsem provedla měření objektivní pomocí automatického refraktometru 400 Essilor (obr. 21) ve fakultní optice. Objektivní refrakce mi usnadnila měření v případě, že vyšetřovaný neměl korekční pomůcku v podobě brýlí či čoček. Pokud měl subjekt stálou korekci v podobě brýlí, změřila jsem ji v automatickém digitálním fokometru Wave Lens Pro (obr. 22) pro výsledné porovnání hodnot. Objektivní měření bylo

provedeno pouze pro získání orientačních hodnot refrakční vady a veškeré měření probíhalo následně subjektivně.



**Obr. 21:** ARK 400 Essilor



**Obr. 22:** Fokometr Wave Lens Pro

### 4.2.3.3 Subjektivní měření

#### 4.2.3.3.1 Fotopické podmínky

Každé měření začínalo zjištěním naturálního vizu. V případě, že měl vyšetřovaný korekci, kterou nosí pravidelně, změřila jsem zrakovou ostrost i s dosavadní korekcí.

Následně měření pokračovalo stanovením monokulární korekce. V této chvíli lze využít objektivních hodnot z autorefraktometru či z dosavadní korekce. V případě, že naměřené hodnoty objektivní refrakce byly nízké či jsem měla podezření na přístrojovou myopii, bylo nutné předsadit konvexní čočku pro potvrzení či vyloučení hypermetropie. Společně s plusovou zkušební čočkou jsem se dotázala, zdali se obraz zhorší nebo zůstane stejný. V případě zhoršeného obrazu čočku nevstupuji do zkušební ohrady. V opačném případě, tedy pokud by obraz zůstal stejný, zamlžím vyšetřovaného na vizus 0,2, čímž mu uvolním akomodaci. Následně předkládám rozptylné čočky do té doby, dokud se obraz nejvíce už shodný. Důraz je kladen na to, aby bylo docíleno nejsilnější možné plusové korekce. V opačném případě, když se vyšetřovanému jeví obraz s konvexní čočkou horší, je tím vyloučena hypermetropie a dále postupuji předložením konkávní čočky. Společně s mínusovou čočkou pokládám otázku, zdali je obraz lepší nebo už stejný. Rozptylnou čočku

vkládám do zkušební obruby do té doby, než se obraz začne jevit jako stejný. V tomto případě koriguji nejslabší možnou konkávní čočkou, s kterou je dosaženo nejlepšího vízu. Astigmatismus jsem měřila pomocí bodového testu a Jacksonova zkříženého cylindru. Nejprve jsem potvrdila nebo vyloučila přítomnost astigmatismu umístěním JZC do  $0^\circ$  a následním otočením do  $90^\circ$ , poté do  $45^\circ$  a  $135^\circ$  společně s dotazem, zdali budou obrazy stejné, či se jeden z nich jeví ostřejší. Tímto jsem zároveň zjistila přibližnou osu cylindru. Dále jsem určila přesnou osu cylindru umístěním rukojeti JZC do prodloužení osy, která se následně otáčí ve směru záporného cylindru, dokud nejsou oba obrazy stejně ostré. Pokračovala jsem stanovením síly cylindru podle toho, zda byl obraz lepší v záporné, či kladné ose a na závěr jsem ještě zkontrolovala osu cylindru. Důležité je také upravit sférický ekvivalent při změně cylindrické korekce. [31]

Po naměření monokulární korekce obou očí jsem se při odstranění okluzní clony dotázala na komfort při odkrytí druhého oka, a jestli došlo ke spojení obrazu. Dále jsem pokračovala Worthovým testem na základě rozdělení vjemů pravého a levého oka pomocí červeného a zeleného filtru. Tímto testem jsem zjišťovala primárně fúzi, popřípadě jsem mohla předběžně zjistit přítomnost heteroforií podle rozmístěných znaků. Subjekt byl dotazován, kolik vidí znaků, zda jsou v jedné linii a případně jaké barvy je dolní znak. Za situace, že by neviděl všechny znaky, by to znamenalo, že má supresi a nemělo by význam pokračovat v binokulárním vyvážení.

Pro akomodační vyvážení jsem zvolila Humphrissovu techniku, kdy je nejprve jedno oko zamlženo  $+0,75$  dpt a druhé je sféricky binokulárně dokorigováno předsazením čoček o hodnotách  $\pm 0,25$  dpt, totéž jsem provedla i na druhém oku.

Heteroforii jsem zjišťovala pomocí Schoberova testu společně s předsazením červeného a zeleného filtru. Pokud byl kříž centrálně, test jsem vyhodnotila tak, že vyšetřovaný netrpí heteroforií. V případě, že se projevila heteroforie, vykorigovala jsem probanda prizmatickou korekcí ve směru posunu značky, tudíž proti směru úchyly. Pro kontrolu a přesnější stanovení prizmatické korekce jsem zvolila ještě jeden test, kterým byl test křížový (K test), s použitím polarizačních filtrů.

Na závěr jsem změřila vízus na inverzních znacích Snellenových písmen (pro následné statistické porovnání změny vízu za fotopických a skotopických podmínek).

#### 4.2.3.3.2 Mezopické podmínky

Subjektivní refrakce za mezopických podmínek probíhala na začátku s fotopickou korekcí. Vyšetřovanému jsem opět změřila vízus (s fotopickou korekcí) a následně byl vykorigován jako za fotopických podmínek s tím rozdílem, že jsem upravovala pouze sférickou korekcí a cylindrická korekce zůstala neměnná. Opětovně jsem už nepoužila Worthův test. Na konci byl změřen výsledný vízus s novou korekcí jak monokulárně, tak binokulárně.

#### 4.2.3.3.3 Skotopické podmínky

Za skotopických podmínek probíhalo měření obdobně. Hlavním rozdílem bylo, že pro zjištění počátečního vízu (s fotopickou korekcí) jsem využila inverzních znaků Snellenových písmen. Následně jsem probanda korigovala na white point testu (bodovém zdroji světla), kdy jsem monokulárně předkládala rozptylné čočky do té doby, dokud se bílý bod nejevil jako ostrý. Při subjektivním měření noční myopie jsem tedy postupovala obdobně, jako při vyšetření myopie za fotopických podmínek. Následně jsem provedla kontrolu na inverzních znacích, kde jsem subjekt dokorigovala monokulárně i binokulárně představením tentokrát konkávních i konvexních čoček, dle dosažení nejlepšího možného vízu. Na závěr jsem opět udělala test na heterofonii, viz fotopické podmínky.

### 4.2.4 Metodika statistické analýzy

Pro statistické zpracování naměřených dat jsem zvolila dvouvýběrový párový t-test. Vzájemně jsem porovnávala naměřená data stejného souboru probandů, kteří byli vyšetřeni stejnou metodou i obdobnou metodou měření za rozdílných světelných podmínek. Pro tuto práci jsem zvolila hladina významnosti  $\alpha = 0,05$ . V případě, že hodnota statistické významnosti  $p$  bude menší než 0,05, je nulová hypotéza  $H_0$  zamítnuta. V takovém případě bude platit alternativní hypotéza  $H_A$ . Pro zpracování statistické analýzy jsem použila Microsoft Excel. [32]

## 4.3 Pracovní hypotézy

### Hypotéza č. 1

$H_{01}$ : Mezopické podmínky nemají vliv na změnu refrakce

$H_{A1}$ : Mezopické podmínky mají vliv na změnu refrakce



## Hypotéza č. 2

H<sub>02</sub>: Skotopické podmínky nemají vliv na změnu refrakce

H<sub>A2</sub>: Skotopické podmínky mají vliv na změnu refrakce

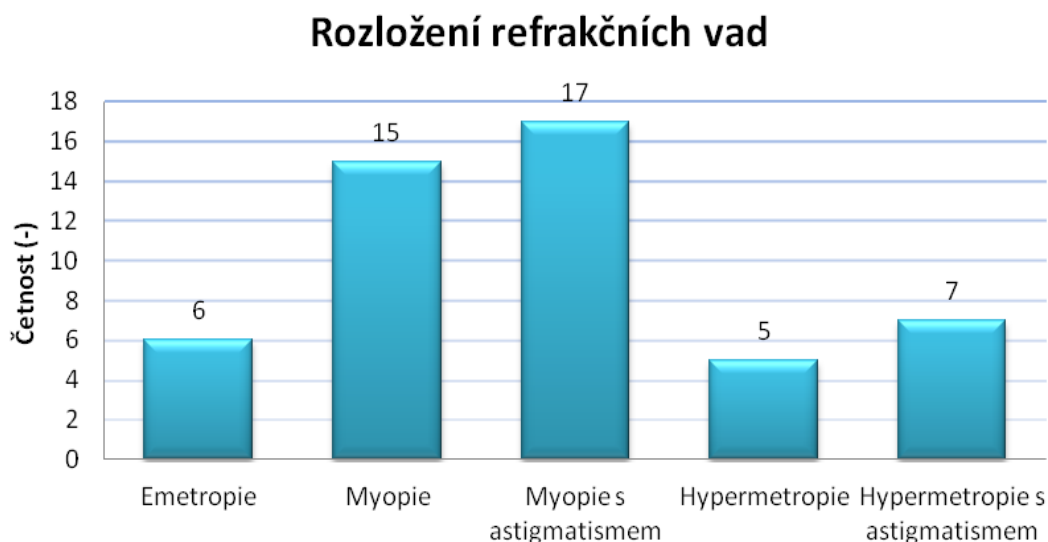
## Hypotéza č. 3

H<sub>03</sub>: Refrakční deficit bude stejný za mezopických i skotopických podmínek

H<sub>A3</sub>: Refrakční deficit bude za skotopických podmínek větší než za mezopických podmínek

## 4.4 Statistická analýza

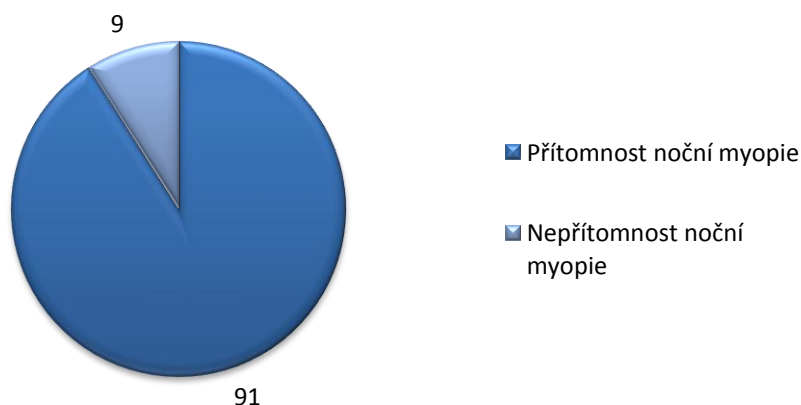
Experimentální části se zúčastnilo 50 probandů, z čehož bylo zastoupeno 38 žen, což činí 76 % z celkového vzorku a 12 mužů, kteří tvořili 24 %. Věková skupina vyšetřovaných se pohybovala od 19 do 31 let, kdy průměrný věk byl  $23,12 \pm 2,21$  let a střední hodnota odpovídala věku 23 let. Experiment byl prováděn na běžném vzorku populace, zastoupeny byly proto všechny refrakční vady. Data s rozložením refrakčních vad jsou znázorněné na grafu 1 (obr. 23), kdy do kategorie emetropů spadají respondenti s refrakční vadou  $\pm 0,25$  dpt. Sférický ekvivalent odpovídal průměrně  $-1,39 \pm 2,14$  dpt z důvodu velkého rozsahu refrakčních vad. Jinými slovy, refrakční stav průměrného oka v tomto testování vychází výrazně myopický. Střední hodnota sférického ekvivalentu poté byla  $-0,75$  dpt.



**Obr. 23:** Graf 1. Rozložení četnosti refrakčních vad

Z následujících grafů je patrné, že přítomnost noční myopie za snížených světelných podmínek se v podobě refrakčního deficitu neprojevila na celém vyšetřovaném vzorku.

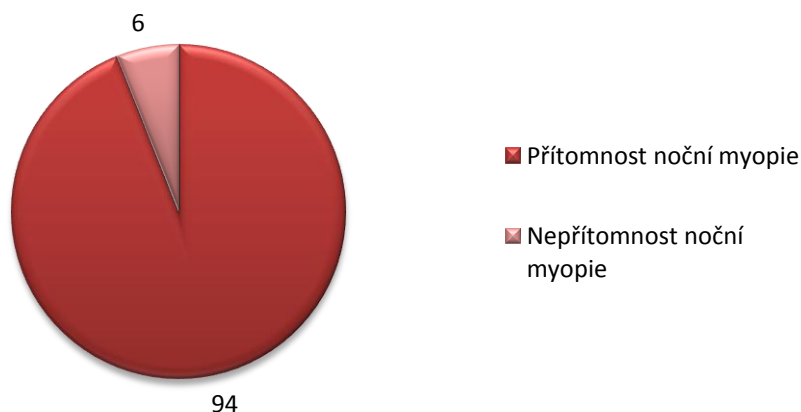
### Změna refrakčního deficitu za mezopických podmínek



**Obr. 24:** Graf 2 Přítomnost noční myopie za mezopických podmínek

Za mezopických podmínek se refrakční deficit projevil u 91 očí probandů a u zbývajících 9 nedošlo k žádné změně v podobě dioptrického rozsahu korekce, která by měla za následek zlepšení zrakové ostrosti, jak vyplývá z grafu 2 (obr.24)

### Změna refrakčního deficitu za skotopických podmínek

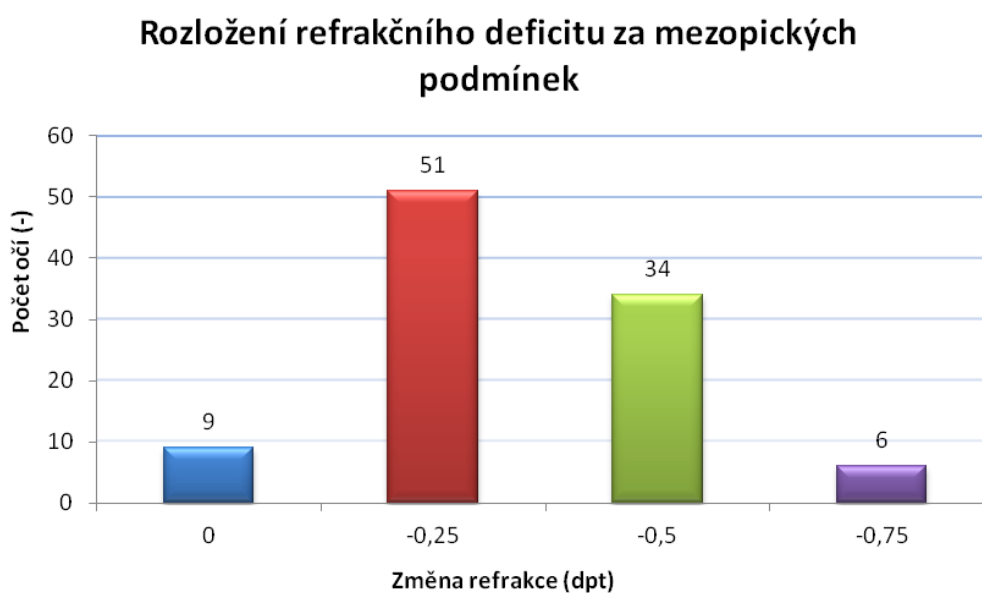


**Obr. 25:** Graf 3. Přítomnost noční myopie za skotopických podmínek

Obdobně také za skotopických podmínek se refrakční deficit neprojevila u všech testovaných. U 94 % došlo k výraznému zlepšení s konkávní čočkou, avšak u 6 % probandů nebyl zaznamenán žádný refrakční deficit nebo byla korekce posunuta směrem do kladných hodnot, jak ukazuje graf 3.

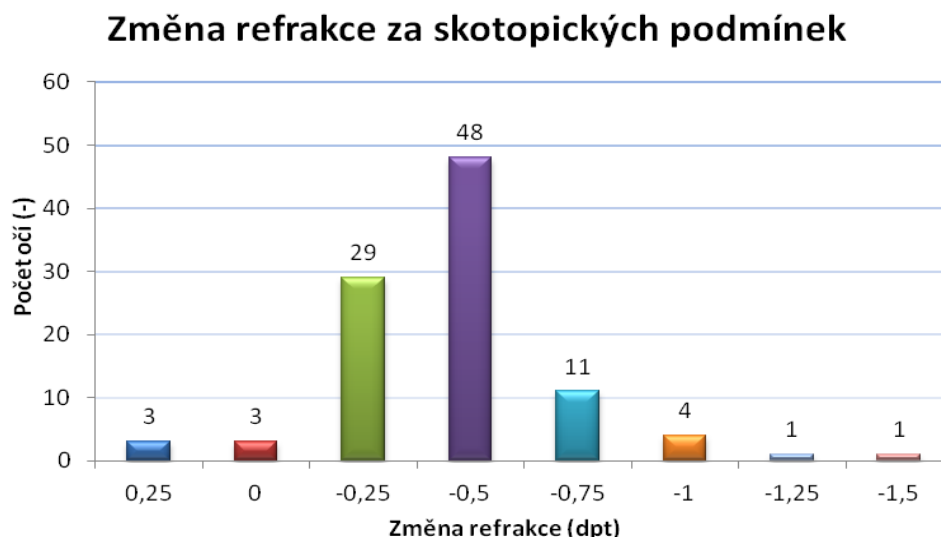
### Korelace hodnot korekce za různých světelných podmínek

Závislost mezi dioptrickou korekcí za fotopických podmínek a mezopických podmínek je velmi silná, korelační koeficient se rovná 0,996, kdy se hodnota blíží skoro 1. Závislost mezi korekcí za fotopických a skotopických podmínek odpovídá obdobnému korelačnímu koeficientu a to 0,987. Tyto hodnoty znázorňují, že je mezi hodnotami korekce vzájemný lineární vztah jak za mezopických, tak skotopických podmínek. Porovnáním korekce za mezopických a skotopických podmínek zjistíme, že za skotopických podmínek se hodnoty korekce budou více lišit od původní fotopické korekce. Dále je porovnán korelační koeficient 0,424 udávající vízus s neoptimálnější možnou korekcí za fotopických podmínek, 0,301 za mezopických podmínek a za skotopických podmínek je hodnota korelačního koeficientu 0,288. Tyto hodnoty ukazují, že nejlepšího vízu bylo dosaženo za fotopických podmínek. Následně za mezopických podmínek bylo docíleno vyššího konečného vízu než za skotopických podmínek. Lineární závislost je tedy v porovnání s mezopickými podmínkami nižší a tím pádem byl nárůst vízu za skotopických podmínek nejmenší.



**Obr. 26:** Graf 4. Rozložení refrakčního deficitu za mezopických podmínek oproti podmínkám fotopickým

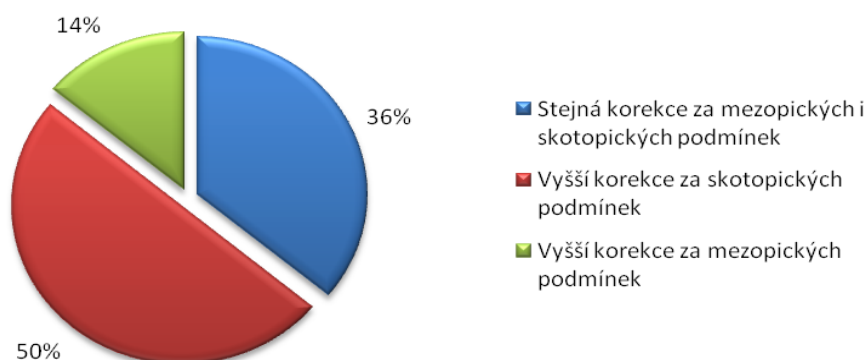
Naměřené hodnoty za mezopických podmínek na výše vyobrazeném histogramu znázorňují četnost refrakčního deficitu. Z grafu 4 můžeme vyčíst, že nejčastěji stanovenou korekcí je právě hodnota  $-0,25$  dpt u více než poloviny testovaných. U 34 % byla pro dosažení maximálního vízu potřebná korekce o hodnotě  $-0,5$  dpt a 6 % probandů mělo refrakční deficit za těchto simulovaných podmínek  $-0,75$  dpt. Dioptrická korekce nezlepšila zrakovou ostrost v případě 9 % testovaných.



**Obr. 27:** Graf 5. Změna refrakce za skotopických podmínek oproti podmínkám fotopickým

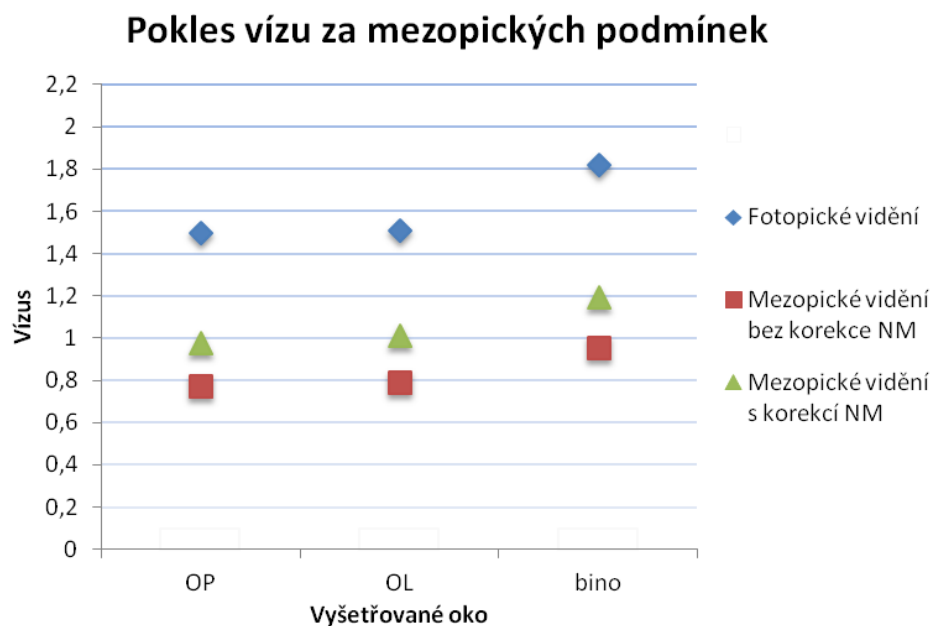
Graf 5 znázorňuje změny refrakce při navození skotopických podmínek. Hodnoty se pohybují v rozmezí rozdílu korekce od +0,25 do -1,5 dpt. Nejčteněji stanovenou korekcí pro skotopické podmínky byla hodnota -0,5 dpt, která nejlépe vyhovovala 48 % vyšetřovaným. Oproti předchozím světelným podmínkám byla u 3 % naměřena konvexní hodnota korekce. Hodnota -1,5 dpt byla naměřena u probanda, který trpěl amblyopií, a to právě na amblyopickém oku, avšak s touto korekcí bylo dosaženo nejlepšího možného vízu.

### Korekce pro mezopické a skotopické podmínky



**Obr. 28:** Graf 6. Korekce NM pro mezopické a skotopické podmínky

Z následujícího grafu 6 lze vyčíst, kolik probandů mělo korekci shodnou jak za mezopických, tak za skotopických podmínek. V mém experimentálním měření to činilo 36 % z celkového vzorku. U poloviny respondentů se vyšší refrakční deficit projevil až za skotopických podmínek a u 14 % testovaných byl stanoven vyšší refrakční deficit za mezopických podmínek oproti podmínkám skotopickým.



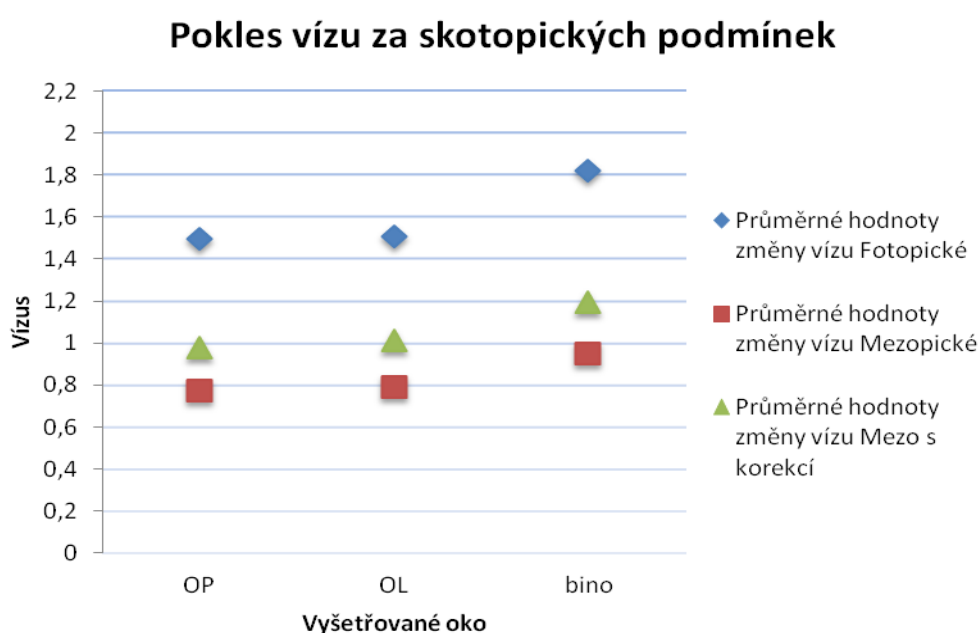
**Obr. 29:** Graf 7. Pokles vízu za mezopických podmínek s korekcí NM a bez ní oproti vízu za fotopických podmínek

V experimentální části jsem se zabývala také změnou zrakové ostrosti za různých světelných podmínek. Z výše zobrazeného grafu 7 lze vyčíst průměrný pokles zrakové ostrosti při mezopických podmínkách. Jsou zde vyneseny hodnoty průměrného vízu 50 probandů pro pravé a levé oko a binokulární vidění. Z důvodu různorodých hodnot zrakové ostrosti probandů nejsou vyneseny chybové úsečky pro přehlednost grafu (průměrná směrodatná odchylka činila 0,21).



**Obr. 30:** Graf 8 Pokles binokulárního vízu za mezopických podmínek s korekcí NM a bez korekce oproti vízu za fotopických podmínek u 3 probandů

Podrobnější data s poklesem vízu za mezopických podmínek jsou vynesena výše ve sloupcovém grafu 8, kde nejsou průměrné hodnoty jako v předešlém grafu, ale konkrétní změny vízu jednotlivých probandů za binokulárního vidění. Zde můžeme vidět jednotlivý pokles za mezopických podmínek, který byl u každého subjektu individuální. První sloupec znázorňuje vízus korigovaného probanda za fotopických podmínek. Druhý sloupec udává pokles vízu za mezopických podmínek s korekcí odpovídající fotopickému vidění. Poslední sloupec znázorňuje vízus za mezopických podmínek s korekcí noční myopie. Z grafu tedy můžeme vyčíst nejen pokles vízu, ale také možné zlepšení zrakové ostrosti s vhodnou korekcí za mezopických podmínek.

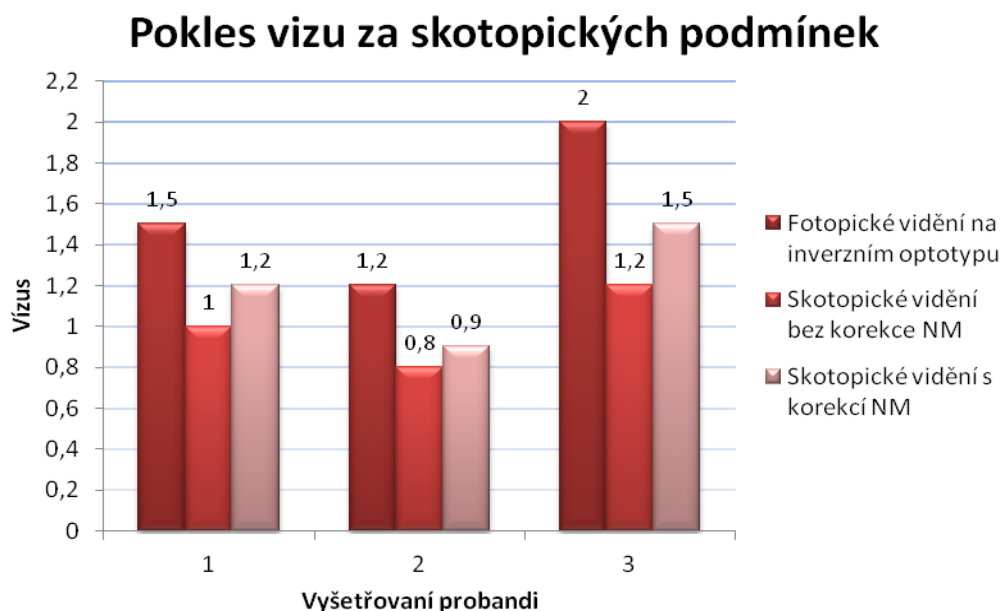


**Obr. 31:** Graf 9 Pokles vízu za skotopických podmínek s korekcí NM a bez korekce oproti vízu za fotopických podmínek

Graf 9 znázorňuje opět průměrný pokles zrakové ostrosti tentokrát za skotopických podmínek. Vynesená data ukazují průměrné hodnoty vízu 50 probandů pro pravé a levé oko a binokulární vidění. Z důvodu různorodých hodnot zrakové ostrosti probandů se směrodatná odchylka pohybovala v rozmezí od 0,16 do 0,19 a pro přehlednost grafu nejsou výše vyneseny chybové úsečky. Z grafu můžeme vyčíst, o kolik průměrně klesl vízus testovaných probandů za skotopických podmínek (červený bod) oproti vízu za fotopických podmínek (modrý bod) a do jaké míry se může vízus s korekcí ještě zlepšit (zelený bod).

Níže ve sloupcovém grafu 10 jsou opět vynesena konkrétní data poklesu a nárůstu vízu za binokulárního vidění tentokrát při skotopických podmínkách. Zde můžeme vidět pokles vízů u jednotlivých 3 probandů. První sloupec znázorněn vízus za fotopických

podmínek, druhý sloupec zaznamenává pokles vízu za skotopických podmínek s korekcí odpovídající fotopickému vidění a následně třetí sloupec vízus za skotopických podmínek s vhodnou korekcí noční myopie. Vízy byly porovnávány ve všech případech na optotypu s inverzním zobrazením.



**Obr. 32:** Graf 10 Pokles binokulárního vízu za skotopických podmínek s korekcí NM a bez korekce oproti vízu za fotopických podmínek u 3 probandů

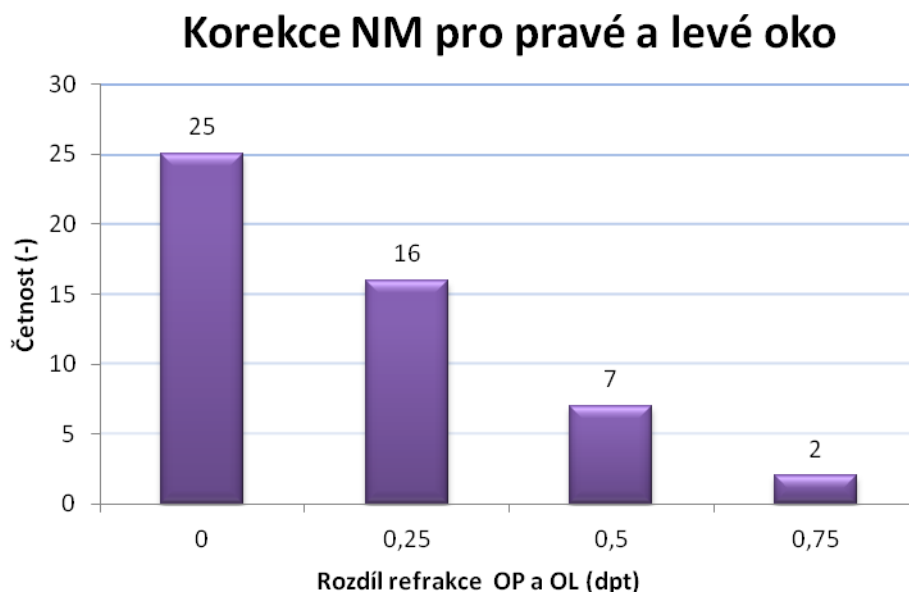
Následující tabulky zaznamenávají průměrnou a střední hodnotu poklesu či nárůstu zrakové ostrosti při uměle navozených mezopických či skotopických podmínkách. Například v tab. 1 vyčteme, že vízus pravého oka nejčastěji klesl o hodnotu 0,4, což v praxi odpovídá poklesu o 4 řádky na optotypu. Po korekci noční myopie se vízus pravého oka nejčastěji zlepšil o dva řádky. Dále z tabulek můžeme vyčíst, že pokles vízu za mezopických podmínek byl daleko vyšší než za skotopických podmínek (objasněno v části 4.6).

**Tabulka 1:** Pokles a nárůst vízu s korekcí NM za mezopických podmínek

	Pokles zrakové ostrosti			Nárůst zrakové ostrosti		
	OP	OL	Bino	OP	OL	Bino
Průměr	0,413	0,393	0,353	0,182	0,178	0,141
Medián	0,4	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1

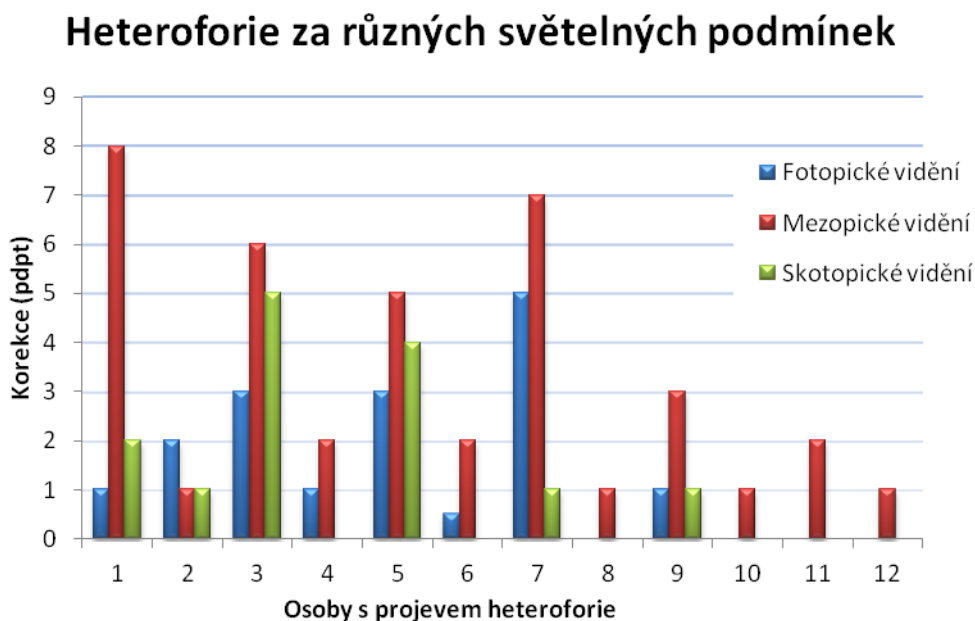
**Tabulka 2:** Pokles a nárůst vízu s korekcí NM za skotopických podmínek

	Pokles zrakové ostrosti			Nárůst zrakové ostrosti		
	OP	OL	Bino	OP	OL	Bino
Průměr	0,179	0,181	0,163	0,115	0,127	0,154
Medián	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1



**Obr. 33:** Graf 11. Rozložení rozdílu refrakce mezi pravým a levým okem za skotopických podmínek

Výše vyobrazený histogram (obr. 33) znázorňuje četnost rozdílu refrakce noční myopie pro pravé a levé oko. Polovina testovaných měla korekci pro pravé a levé oko totožnou. U 34 % probandů bylo dosaženo nejoptimálnější korekce s rozdílem 0,25 dpt mezi pravým a levým okem. 14 % respondentů mělo rozdílnou korekci mezi pravým a levým okem o 0,5 dpt a u dvou subjektů to činilo 0,75 dpt.



**Obr. 34:** Graf 12. Rozložení heteroforie za fotopických, mezopických a skotopických podmínek u 12 probandů



Okrajově jsem se v práci zabývala také mírou heteroforie při různých světelných podmínkách. Z 50 probandů heterofonií trpělo v průběhu měření za třech různých osvětlení celkem 12 respondentů. Skryté šilhání se projevilo za fotopických podmínek u 8 testovaných. Dále byla heteroforie zaznamenána u 4 subjektů pouze při navozených mezopických podmínkách (osoba 8, 10, 11, 12). Heteroforie dosahovala nejvyšších hodnot prizmatické korekce za mezopických podmínek (kromě subjektu 2). Konkrétní data lze vyčíst výše z grafu 12 (obr. 34), kde je vyznačena velikost prizmatické korekce pro jednotlivé světelné podmínky u 12 testovaných osob.

Níže jsou vyneseny výsledky následujících 3 hypotéz.

### **Hypotéza č. 1**

$H_{01}$ : Mezopické podmínky nemají vliv na změnu refrakce

$H_{A1}$ : Mezopické podmínky mají vliv na změnu refrakce

Na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  jsem pomocí dvouvýběrového párového t testu na střední hodnotu vypočítala hodnotu  $p = 1,67^{-34}$  a na základě výsledku zamítám nulovou hypotézu  $H_{01}$  a přijímám oboustrannou alternativní hypotézu  $H_{A1}$ .

### **Hypotéza č. 2**

$H_{02}$ : Skotopické podmínky nemají vliv na změnu refrakce

$H_{A2}$ : Skotopické podmínky mají vliv na změnu refrakce

Na základě dvouvýběrového párového t-testu na střední hodnotu s hladinou významnosti  $\alpha = 0,05$  jsem pro  $p = 2,02^{-23}$  zamítla nulovou hypotézu  $H_{02}$  a přijímám alternativní oboustrannou hypotézu  $H_{A2}$ .

### **Hypotéza č. 3**

$H_{03}$ : Refrakční deficit bude stejný za mezopických i skotopických podmínek

$H_{A3}$ : Refrakční deficit bude za skotopických podmínek větší než za mezopických podmínek

Na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  jsem pomocí dvouvýběrového párového t testu na střední hodnotu vypočítala hodnotu  $p = 2,27^{-5}$  a na základě výsledku zamítám nulovou hypotézu  $H_{03}$  a přijímám jednostrannou alternativní hypotézu  $H_{A3}$ .

## Diskuze

Využitím párového t-testu pro závislé vzorky je výše prezentováno zamítnutí hypotézy  $H_{01}$  a přijetí alternativní hypotézy  $H_{A1}$ , která zní, že mezopické podmínky mají vliv na změnu refrakce. To můžeme zaznamenat také na grafu 2 znázorňujícím počet probandů se změnou refrakce. U všech vyšetřovaných sice nebyl zaznamenán projev noční myopie v podobě refrakčního deficitu, avšak symptomy jako rozšíření zornice a s tím spjaté aberace vyšších řádů se dostavily u všech vyšetřovaných, které se následně projeví poklesem vízu.

Druhá hypotéza byla opět zamítnuta a byla přijata alternativní hypotéza  $H_{02}$ , která uvádí, že skotopické podmínky mají vliv na změnu refrakce. Obdobně jako v první hypotéze můžeme sledovat refrakční projev za skotopických podmínek na grafu 3. Stejně jako v předchozím případě i zde se noční myopie v podobě refrakčního deficitu neprojevila u všech probandů. Důvodem mohla být nepřesně stanovená subjektivní refrakce za fotopických podmínek či špatné posouzení testovaného nebo respondent netrpěl tak velkou hodnotou sférického deficitu, že by mohl být korigován zkušební čočkou s hodnotou  $-0,25$  dpt.

V případě skotopických podmínek byla u 3 očí (2 probandů) stanovena za nejlepší možnou korekci konvexní čočka o hodnotě  $+0,25$  dpt. V obou případech šlo o hypermetropii, což mohlo být zapříčiněno nedostatečným uvolněním akomodace při stanovení subjektivní refrakce za fotopických podmínek.

Vyvrácením poslední hypotézy  $H_{03}$  pomocí párového t-testu a tudíž přijetím alternativní jednostranné hypotézy  $H_{A3}$  bylo potvrzeno, že refrakční deficit bude za skotopických podmínek větší než za mezopických podmínek. To je také graficky znázorněno v grafu 4 pro mezopické podmínky a grafu 5 pro podmínky skotopické. Noční myopie dosahuje nejčastěji hodnot  $-0,25$  dpt za mezopických podmínek a  $-0,5$  dpt za skotopických podmínek. Vyšší hodnoty při skotopických podmínkách mohou být vysvětleny tím, že subjekt ztrácí ve tmě akomodační podnět a tím dochází k přehnané akomodaci a nárůstu noční myopie. Avšak v případě mého testování byli probandi vyšetřováni na bodovém zdroji světla (white point test) a inverzním provedení Snellenových písmen. Respondenti měli tedy akomodační podnět prostřednictvím světelného zdroje optotypu. Inverzní zobrazení na druhou stranu mohlo způsobovat nepříjemné oslnění a záři okolo znaků. V případě, že se projevila noční myopie, mínusová korekce tuto záři (glare) do jisté míry eliminuje. Dalším důvodem vyššího refrakčního deficitu za skotopických podmínek je větší průměr pupil se snižujícím se osvětlením.

V praktické části práce jsem se dále zabývala poklesem vízu za snižujících se světelných podmínek. Ze zjištěných předchozích hodnot, kdy je refrakční deficit větší za skotopických podmínek oproti podmínkám mezopickým, by mělo vyplynout, že za těchto podmínek dojde taktéž k většímu poklesu vízu. To však při mém experimentálním měření nenastalo. Jak je patrné z tabulky 1 a 2, průměrné i střední hodnoty ukazují, že monokulárně i binokulárně klesl vízus více za mezopických podmínek. To mohlo být způsobeno speciálními brýlemi, které navozovaly mezopické vidění. Vyšetřovaní si často stěžovali na problikávání písmen na optotypu. Dále měli nasazenou zkušební brýlovou obrubu s korekcí odpovídající fotopickým podmínkám a až na této obrubě mezopické brýle, což vedlo k další redukci vstupujícího světla do oka a mohlo to zapříčinit pokles zrakové ostrosti. V neposlední řadě se společně s navozením mezopického vidění pomocí filtru brýlí snížila i kontrastní citlivost, což u skotopických podmínek u reverzního zobrazení neplatilo.

Zajímavou statistickou částí, která stojí za povšimnutí, je porovnání hodnot korekce mezi pravým a levým okem. Noční myopie se v České republice prozatím konvenčně nevyšetřuje, avšak na PolaScopu 3D je možné ji změřit. Metodika refrakce uvádí, že se subjekt koriguje vždy binokulárně a u obou očí je předsazována stejná korekční hodnota jako u adice. V rámci této práce jsem prováděla refrakci noční myopie nejprve monokulárně a poté binokulárně jako u klasického vyšetření za fotopických podmínek. Jak je patrné na grafu 11, pouze u poloviny probandů byl refrakční deficit shodný jak pro pravé, tak pro levé oko. Rozdíl  $-0,75$  dpt u dvou subjektů byl u jednoho zapříčiněn nejspíše z důvodu amblyopie (podkorigování amblyopického oka z binokulárních důvodů za fotopických podmínek) a druhý testovaný byl jednostranně hypermetropický, což mohlo zapříčinit opět nedostatečné uvolnění akomodace. Tento refrakční rozdíl si můžeme vysvětlit také tím, že každé oko mohlo jinak akomodovat či byla rozdílná velikost pupil mezi pravým a levým okem a tím pádem jiný vliv aberací.

Okrajově jsem se také zabývala změnami heteroforie za mezopických a skotopických podmínek. Jak ukazuje graf 12, nejvíce se heteroforie projevila za mezopických podmínek. To mohlo být způsobeno tím, že společně s mezopickými brýlemi se snížil kontrast fixovaného znaku.

## Závěr

Noční myopie zůstává dodnes diskutovaným tématem. Dle studií se můžeme domnívat, že na vzniku noční myopie má největší podíl již zmíněná akomodace. Ve tmě oko ztrácí akomodační podněty a dochází k tonické akomodaci, která dosahuje u mladých lidí přibližně 1,00 dpt. To však platí při skotopických podmínkách, kdy je zorné pole bez podnětu. Noční myopie však nastává i za mezopických podmínek. Příčinou tedy není samotná akomodace.

Se snižujícím se osvětlením se zároveň rozšiřuje zornice a tím se projevují aberace vyšších řádů, například sférická aberace. V důsledku sférické aberace vzniká na sítnici neostřý obraz a oko ve snaze vyrovnat tento obraz začne přehnaně akomodovat. Sférická aberace s rostoucí akomodací sice klesá, ale zároveň přehnaná akomodace způsobí posun sítnicového obrazu směrem k rohovce, což oko myopizuje. Dalo by se tedy říci, že na vzniku noční myopie se podílí několik faktorů, které se vzájemně ovlivňují, a v tomto případě kompenzací jednoho prvku vzniká jiný. Na noční myopii mají vliv i jiné aberace, sice podstatně menší než sférická aberace, avšak hrají také nezanedbatelnou roli. Chromatická aberace v souvislosti se změnou maximální spektrální citlivosti s klesajícím jasnem (Purkyňův jev) se také podílí na vzniku noční myopie. Vlivem barevné vady se kratší vlnové délky lámou více a ohnisko vzniká před sítnicí. Současně při nízké intenzitě světla je oko citlivější právě na tyto kratší vlnové délky (okolo 500 nm), čímž se také participuje na částečné myopizaci oka. Ke zhoršení vizu přispívá také difrakce a koma, které jsou vyvolány změnou velikosti pupily. Dodnes nejsou zjištěny jednotlivé hodnoty každé složky, podílející se na vzniku noční myopie.

V experimentální práci jsem na vzorku 50 probandů naměřila hodnoty noční myopie za mezopických a skotopických podmínek. Cílem práce bylo ověření hypotéz, z kterých vyplývá, že noční myopie se projeví v podobě refrakčního deficitu jak za mezopických, tak za skotopických podmínek. Na základě statisticky významných dat byl zaznamenán refrakční deficit za mezopických podmínek  $-0,25$  dpt a za skotopických podmínek  $-0,5$  dpt.

Závěrem bych chtěla dodat, že moderní optometrie by měla brát v úvahu požadavky klientů na vidění za všech světelných podmínek, ne jen těch, které se podobají podmínkám ve vyšetřovací místnosti. Proto by korekce noční myopie byla do budoucna velkým přínosem.

## Seznam použité literatury

- [1] BENJAMIN, W. J. *Borish's Clinical Refraction*. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 2006. 1712 p. ISBN 978-0-7506-7524-6.
- [2] ROZSÍVAL, P., et al. *Oční lékařství*. 1st ed. Praha: Galén, 2006. 373 p. ISBN 8072624040.
- [3] KOLÍN, J. *Oční lékařství*. 2nd ed. Praha: Karolinum, 2007. 110 p. ISBN 978-80-246-1325-3.
- [4] Myopia (Nearsightedness). American Optometric Association. <http://www.aoa.org/patients-and-public/eye-and-vision-problems/glossary-of-eye-and-vision-conditions/myopia?sso=y#2> (accessed Nov 21, 2016).
- [5] AUTRATA, R., VANČUROVÁ, J. *Nauka o zraku*. 1st ed. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví v Brně, 2002. 226 p. ISBN 80-7013-362-7.
- [6] SYNEK, S., SKORKOVSKÁ, Š. *Fyziologie oka a vidění*. 1st ed. Praha: Grada Publishing, 2004. 94 p. ISBN 80-247-0786-1.
- [7] POLÁŠEK, J. *Technický sborník oční optiky*. Praha: SNTL, 1974. 579 p. [8] P. SGALL, J. PANEVOVÁ: *Jak psát a jak nepsat česky*. Praha: Karolinum, 2004. 200 s. ISBN 80-246-0871-5.
- [8] ANTON, M. Myopie. *Česká oční optika*, 2006, vol. 47, no. 1, p. 18–20. ISSN 211-233X.
- [9] KRAUS, H. *Kompendium očního lékařství*. 1st ed. Praha: Grada Publishing, 1997. 360 p. ISBN 9788071690795.
- [10] JONG, M., SANKARIDURG, P., NAIDOO, K. Myopia: A public health crisis in waiting. *Points de Vue*, 2016, vol. 73, p. 44–48. ISSN 1290-9661.
- [11] SKUSEVICH, D., MATIKAS, P. (ed.). *Color Perception: Physiology, Processes and Analysis*. 1st ed. Nova Science Publishers Inc, 2010. 286 p. ISBN 978-1-60876-077-0.
- [12] DOSHI, S., HARVEY, W. *Eye Essentials: Assessment & Investigative Techniques*. 1st ed. Butterworth-Heinemann, 2005. 208 p. ISBN 978-0-7506-8853-6.
- [13] TURCAJOVÁ, R. Barevné vidění: druhý pohled. Paladix. <https://www.paladix.cz/clanky/barevne-videni-druhy-pohled.html> (accessed Nov 30, 2016).

- [14] STROEBEL, L. D., ZAKIA, R. D., PELZ, J. *The Focal Encyclopedia of Photography*. 3rd ed. Focal Press, 1993. 914 p. ISBN 9780240514178.
- [15] HABEL, J., ŽÁK, P. Význam mezopického vidění pro praxi. *Světlo* [online]. 2007, no. 6 [cited 2016-12-18]. Available from <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/vyznam-mezopickeho-videni-pro-praxi--16105> . ISSN 1212-0812.
- [16] FREDRICK, D. R. Myopia. *Br. Med. J.* [online]. 2002, vol. 324, no. 7347 [cited 2016-12-12], p. 1195–1199.
- [17] RÝPAROVÁ, H., PLUHÁČEK, F. Stanovení velikosti noční myopie pomocí vybraných testových znaků za mezopických podmínek. *Jemná mechanika a optika věda - výzkum - technologie - realizace : technický oborový časopis = Fine mechanics and optics*, 2015, vol. 60, no. 4, p. 132–135. ISSN 0447-6441.
- [18] ŽÁK, P. Barva světla ve veřejném osvětlení – Část 2. Vliv prostředí a adaptačních podmínek na zrakový vjem. *Světlo* [online]. 2015, no. 5 [cited 2016-12-26]. Available from <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/barva-svetla-ve-verejnem-osvetleni-cast-2-vliv-prostredi-a-adaptacnich-podminek-na-zrakovy-vjem--1239> . ISSN 1212-0812.
- [19] ADÁMKOVÁ, H. Noční myopie. *Česká oční optika*, 2014, vol. 55, no. 4, p. 40–44. ISSN 1211–233X.
- [20] KRUEGER, R., MACRAE, S., APPLGATE, R. (ed.). *Wavefront Customized Visual Correction: The Quest for Super Vision II*. 2nd ed. Slack Incorporated, 2003. 416 p. ISBN 978-1556426254.
- [21] ROSENFELD, M., et al. Tonic accommodation review. *Ophthalmic and Physiological Optics* [online]. 1994, vol. 14 [cited 2016-12-28]. Available from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1475-1313.1994.tb00007.x/epdf> . ISSN 1475-1313.
- [22] SUDER, M. Aberace oka v optometrické praxi I - IV [presentation]. Carl Zeiss spol. s r.o., Praha, [cited 2016-12-26]
- [23] LÓPEZ-GIL, N., PEIXOTO-DE-MATOS, S. C., THIBOS, L. N. Shedding light on night myopia. *Journal of Vision* [online]. 2012, vol. 12, no. 4 [cited 2016-12-10]. DOI: [doi:10.1167/12.5.4](https://doi.org/10.1167/12.5.4). Available from <http://jov.arvojournals.org/article.aspx?articleid=2191990> . ISSN 1534-7362.

- [24] PolaSkop3D aktivní rám – více zážitků, více výsledků. Augenoptik Domažlice s.r.o.. <http://www.mailshop.cz/cs/uvod-novinky/document-85/> (accessed Dec 05, 2016).
- [25] Brýlové čočky DriveSafe. Zeiss. [https://www.zeiss.cz/vision-care/cs\\_cz/zeiss-vyroby/brylove-cocky-drivesafe.html](https://www.zeiss.cz/vision-care/cs_cz/zeiss-vyroby/brylove-cocky-drivesafe.html) (accessed Dec 14, 2016).
- [26] ARTAL, P., SCHWARZ, C., CÁNOVAS, C. Night Myopia Studied with an Adaptive Optics Visual Analyzer. *PLoS ONE* [online]. 2012 [cited 2016-12-25]. DOI: 10.1371/journal.pone.0040239. Available from <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0040239#s1>.
- [27] CHYTIL, D. Noční myopie. *Česká oční optika*, 2015, vol. 56, no. 2, p. 56–60. ISSN 1211-233X.
- [28] ADÁMKOVÁ, H. Noční myopie - Night Myopia. In PETROVÁ, S. (ed.). *4. celostátní studentská konference Optometrie: Brno, 17.10.2013*.
- [29] EYEDRIVE INOVACE PRO ŘIDIČE. Essilor. <http://www.essilor.cz/CS/novinky/Stranky/EYEDRIVE-%C5%99e%C5%A1en%C3%AD-pro-%C5%99idi%C4%8De.aspx> (accessed March 12, 2017).
- [30] HEINZ, R. *Noční myopie*. [online prezentace] Kladno: ČVUT FBMI, 23. 3. 2017
- [31] BENJAMIN, W. J. *Borish's clinical refraction*. Philadelphia: W.B. Saunders Company, 1998. ISBN 0-7216-5688-9.
- [32] GIBILISCO, S. *Statistika bez předchozích znalostí*. Brno: Computer Press, 2009. ISBN 978-80-251-2465-9

## Seznam symbolů a zkratk

AA	Akomodační amplituda (šíře)
Bino	Binokulární vidění
dpt	Dioptrie
JZC	Jacksonův zkřížený cylindr
NM	Noční myopie
OL	Oko levé
OP	Oko pravé
pdpt	Prizmatická dioptrie
TA	Tonická akomodace



## Seznam obrázků

<b>Obr. 1:</b> Paprsky dopadající na sítnici emetropického a myopického oka.....	3
<b>Obr. 2:</b> Paprsky dopadající na sítnici myopického oka a oka korigovaného konkávní čočkou ..	7
<b>Obr. 3:</b> Vrstvy sítnice .....	9
<b>Obr. 4:</b> Závislost citlivosti tyčinek a čípků na vlnové délce.....	11
<b>Obr. 5:</b> Graf průběhů spektrálních citlivostí lidského zraku pro fotopické, mezopické a skotopické vidění .....	13
<b>Obr. 6:</b> Závislost průměru oční štěrbin $\emptyset$ na jas $L$ pozorovaného předmětu .....	16
<b>Obr. 7:</b> Mechanismus akomodace (A – pohled do dálky, B – pohled do blízka) .....	18
<b>Obr. 8:</b> Purkyňův jev .....	21
<b>Obr. 9:</b> Simulované sítnicové obrazy oka a optotyp pro dva průměry pupily (2mm, 6mm)...	22
<b>Obr. 10:</b> Sférická vada při zobrazení předmětu z konečné vzdálenosti .....	23
<b>Obr. 11:</b> Chromatická aberace .....	24
<b>Obr. 12:</b> Difrakce v závislosti na průměru zornice.....	25
<b>Obr. 13:</b> Difrakce v závislosti na průměru zornice a refrakční vadě .....	26
<b>Obr. 14:</b> Schéma modifikovaného Badalova optometru .....	29
<b>Obr. 15:</b> Graf relativního rozostření obrazu (dpt) v závislosti na jas stimulu ( $\log \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ) ..	30
<b>Obr. 16:</b> Graf závislosti rozostření obrazu (dpt) na jas ( $\log \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ) vlivem sférické aberace .....	30
<b>Obr. 17:</b> Graf závislosti rozostření obrazu (dpt) na jas ( $\log \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ) vlivem akomodace .....	31
<b>Obr. 18:</b> White point test (A – rozptýlený bod před korekcí, B – ostrý bod po korekci) .....	33
<b>Obr. 19:</b> Test oslnění .....	33
<b>Obr. 20:</b> Test noční myopie .....	34
<b>Obr. 21:</b> ARK 400 Essolor .....	39
<b>Obr. 22 :</b> Fokometr Wave Lens Pro .....	39
<b>Obr. 23:</b> Graf 1 Rozložení četnosti refrakčních vad .....	42
<b>Obr. 24:</b> Graf 2 Přítomnost noční myopie za mezopických podmínek .....	43

<b>Obr. 25:</b> Graf 3 Přítomnost noční myopie za skotopických podmínek .....	43
<b>Obr. 26:</b> Graf 4 Rozložení refrakčního deficitu za mezopických podmínek oproti podmínkám fotopickým.....	44
<b>Obr. 27:</b> Graf 5 Změna refrakce za skotopických podmínek oproti podmínkám fotopickým	45
<b>Obr. 28:</b> Graf 6 Rozložení korekce NM pro mezopické a skotopické podmínky .....	45
<b>Obr. 29:</b> Graf 7 Pokles vízu za mezopických podmínek s korekcí NM a bez ní oproti vízu za fotopických podmínek .....	46
<b>Obr. 30:</b> Graf 8 Pokles binokulárního vízu za mezopických podmínek s korekcí NM a bez korekce oproti vízu za fotopických podmínek u 3 probandů .....	46
<b>Obr. 31:</b> Graf 9 Pokles vízu za skotopických podmínek s korekcí NM a bez korekce oproti vízu za fotopických podmínek.....	47
<b>Obr. 32:</b> Graf 10 Pokles binokulárního vízu za skotopických podmínek s korekcí NM a bez korekce oproti vízu za fotopických podmínek u 3 probandů .....	48
<b>Obr. 33:</b> Graf 11 Rozložení rozdílu refrakce mezi pravým a levým okem za skotopických podmínek .....	49
<b>Obr. 34:</b> Graf 12 Rozložení heterofonie za fotopických, mezopických a skotopických podmínek u 12 probandů .....	49

## Seznam tabulek

**Tabulka 1:** Pokles a nárůst vízu s korekcí NM za mezopických podmínek.....48

**Tabulka 2:** Pokles a nárůst vízu s korekcí NM za skotopických podmínek.....48

## Seznam příloh

<b>Příloha 1:</b> Tabulka dat subjektivní refrakce 50 probandů .....	62
--	----

Příloha 1: Tabulka dat subjektivní refrakce 50 probandů

Fotopické vidění										Mezopické vidění										Skotopické vidění																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
korekce					vizus					vizus bez korekce					korekce					vizus bez korekce					korekce					vizus bez korekce					vizus s korekcí																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
OP	sph	cyl	OL		OP	OL	bino			OP	OL	bino			OP	OL	bino			OP	OL	bino			OP	OL	bino			OP	OL	bino			OP	OL	bino																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
-6	-	-	-6	-	1,2	1,5	1,5	1,5	1,2	1,2	1,5	1,5	1,2	1,2	2	-0,25	-	-0,5	-	-0,5	-	0,7	0,8	0,9	0,9	1	1	1	1	1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,